

FILIPE COELHO
NORA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA INTERNA DO ROTOR DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA DE RELUTÂNCIA MAGNÉTICA VARIÁVEL

Dissertação submetida como requisito parcial para
obtenção do grau de **Mestre em Engenharia
Eletrotécnica e de Computadores – Ramo de
Energias Renováveis e Sistemas de Potência**

Orientador

Prof. Silviano Francisco Santos Rafael

Júri

Presidente: Prof. Armando José Pinheiro Marques
Pires, ESTSetúbal/IPS

Orientador: Prof. Silviano Francisco Santos
Rafael, ESTSetúbal/IPS

Vogal: Prof. Pedro José Ambrósio Lobato,
ESTSetúbal/IPS

Março de 2021

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, que me acompanharam no processo de realização desta dissertação. Motivaram-me para uma rápida conclusão e para ser paciente com o processo que requer a realização de uma dissertação.

Gostaria de agradecer também aos meus amigos que me ajudaram a aliviar a pressão que estava sobre mim. Que me ajudaram a gerir o meu tempo entre vida pessoal e a escola.

Por fim, gostaria de agradecer ao meu orientador, o professor Silviano Rafael, que me ajudou a escolher o tema e que me guiou durante todo o processo. O professor esteve sempre a par de todo o processo e sempre forneceu críticas construtivas para uma melhor apresentação do trabalho, assim como dicas para um melhor funcionamento com o programa *FEMM*.

Resumo

Nesta dissertação é apresentada uma introdução à máquina síncrona de relutância magnética variável, sobre a sua história e o seu princípio de funcionamento. São apresentadas também as características gerais da máquina assim como o esquema equivalente e o modelo matemático que o define.

No desenvolvimento do trabalho, foi escolhido o programa denominado por *Finite Element Method Magnetics (FEMM)* para a análise da distribuição dos campos magnéticos, dos fluxos e do binário das topologias da máquina. Para a utilização deste programa foi necessário desenhar os modelos construtivos da máquina e caracterizar todos os materiais constituintes, de forma a poder efetuar as simulações em diferentes regimes.

Inicialmente desenvolveu-se três topologias de estudo baseados numa topologia simplificada de duas barreiras de fluxo, no entanto, com o decorrer do trabalho, foi considerado interessante analisar duas variantes construtivas de uma das topologias. Tendo essas variantes o objetivo de analisar a possibilidade de melhoria de uma grandeza mecânica através das diferenças do material das barreiras. As três topologias iniciais apresentam diferenças construtivas desde o número de barreiras até às dimensões das mesmas.

No processo de simulação das topologias estudadas, foram obtidos resultados que caracterizam a máquina quanto à magnetização e binário da máquina, tendo estes sido apresentados e comentados.

Palavras chave: *SynRM*, Barreira de fluxo, Grossura das barreiras, Material da barreira, Número de barreiras.

Abstract

This thesis will shine a light on the history of the synchronous reluctance machine and its operating principle. It is also presented the general characteristics of the machine, as well as the equivalent circuit and the mathematical model that defines it.

In the development of this work, the program chosen was the Finite Element Method Magnetics (FEMM) to analyse the distribution of the magnetic fields, of the flux and the torque of the models of the machine. To utilize this program, it was necessary to previously draw the constructive topologies of the machine and it was required to characterize all the materials that composed the machine, in order to be able to simulate different regimes.

Initially, three topologies of study would be presented, however, with the development of the work, it was considered interesting to present two constructive variants of one of them. Those variant models, have the goal to analyse the possibility of improvement of the torque, using the differences of the barriers material. The three initial topologies show constructive differences, which can go from the number of barriers to the variation of the dimension.

In the simulation process for the studied topologies, data was obtained that characterize the machine, regarding its magnetization and torque, having these results been presented and commented.

Key words: *SynRM*, Flux barriers, Dimensions of the barriers, Barrier material, Number of barriers.

Índice

AGRADECIMENTOS	II
RESUMO	III
ABSTRACT	IV
LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABELAS	4
LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS	5
LISTA DE SÍMBOLOS	6
1 INTRODUÇÃO	8
2 INTRODUÇÃO DA MÁQUINA	10
3 ENQUADRAMENTO TEÓRICO.....	12
3.1 CONSTITUIÇÃO DA MÁQUINA	12
3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	14
3.3 APLICAÇÕES.....	17
3.4 CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA	18
3.4.1 <i>Modelo.....</i>	<i>18</i>
3.4.2 <i>Característica magnética.....</i>	<i>21</i>
3.4.3 <i>Característica do Binário</i>	<i>25</i>
4 ESTRUTURAS A ANALISAR	26
4.1 TOPOLOGIA 1.....	27
4.2 TOPOLOGIA 2.....	28
4.3 TOPOLOGIA 3.....	28
5 SIMULAÇÕES DAS TOPOLOGIAS	29
5.1 TOPOLOGIA 1.....	29
5.2 TOPOLOGIA 2.....	33
5.3 TOPOLOGIA 2A	37
5.4 TOPOLOGIA 2B.....	41
5.5 TOPOLOGIA 3.....	45
6 DISCUSSÃO DE RESULTADOS	49
6.1 RESULTADOS DO TOPOLOGIA 1.....	49
6.2 RESULTADOS DA TOPOLOGIA 2	56
6.3 RESULTADOS DA TOPOLOGIA 2A.....	61
6.4 RESULTADOS DO TOPOLOGIA 2B.....	66
6.5 RESULTADOS DA TOPOLOGIA 3	72
7 CONCLUSÃO	78
8 REFERÊNCIAS.....	80

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Classificação de motores segundo [14].....	10
Figura 3.1 - Rotor axial laminado (retirado de [13]).....	13
Figura 3.2 - Rotor de barreiras de fluxo (retirado de [13]).....	13
Figura 3.3 – Exemplo de rotor de barreiras de fluxo (alterado a partir de [13])	14
Figura 3.4 - Perdas de potência num motor de indução e num motor de relutância variável (retirado de [13]).....	15
Figura 3.5 - Aplicação de SynRM num misturador industrial (retirado de [13]).	17
Figura 3.6 - Aplicação de SynRM na indústria têxtil (retirado de [13]).	17
Figura 3.7 - Circuito equivalente da SynRM com perdas no núcleo - A representa o eixo direto e B eixo em quadratura (retirado de [8]).....	18
Figura 3.8 – Curvas de magnetização nas posições alinhada e desalinhada (retirado de [7])	22
Figura 3.9 - Característica magnética genérica com o Fluxo em função da posição do rotor (retirado de [17]).	23
Figura 3.10 - Característica genérica não linear do Coeficiente de indução de uma fase em função da posição do rotor (retirado de [17]).	24
Figura 3.11 – Característica genérica do binário em função da posição do rotor (retirado de [17] e comprovado por Martins).....	25
Figura 4.1 - topologia 1 da máquina.....	27
Figura 4.2 - Topologia 2 da máquina.	28
Figura 4.3 - Topologia 3 da máquina.	28
Figura 5.1 - Topologia 1 no FEMM com materiais definidos.....	30
Figura 5.2 - Mesh da topologia 1.....	30
Figura 5.3 - Característica do binário da topologia 1.	31
Figura 5.4 - Característica não linear do coeficiente de indução de uma fase da topologia 1 em função da posição do rotor.	32
Figura 5.5 - Característica magnética do fluxo da topologia 1 em função da posição do rotor.....	32
Figura 5.6 - Curvas de magnetização da topologia 1 para as diferentes posições simuladas.	33
Figura 5.7 - Topologia 2 no FEMM com materiais definidos.....	34
Figura 5.8 - Mesh do topologia 2.....	34
Figura 5.9 - Característica do binário da topologia 2 em função da posição do rotor... ..	35
Figura 5.10 - Característica não linear do coeficiente de indução de uma fase da topologia 2 em função da posição do rotor.	36
Figura 5.11 - Característica magnética do Fluxo da topologia 2 em função da posição do rotor.....	36
Figura 5.12 - Curvas de magnetização da topologia 2 para as posições simuladas.....	37
Figura 5.13 - Topologia 2A no FEMM com materiais definidos.	38

Figura 5.14 - Mesh da topologia 2A.....	38
Figura 5.15 - Característica do binário da topologia 2A em função da posição do rotor.	39
Figura 5.16 - Característica não linear do coeficiente de indução de uma fase da topologia 2A em função da posição do rotor.....	40
Figura 5.17 - Característica magnética do fluxo da topologia 2A em função da posição do rotor.....	40
Figura 5.18 - Curvas de magnetização da topologia 2A para as posições simuladas.....	41
Figura 5.19 - Topologia 2B no FEMM com materiais definidos	42
Figura 5.20 - Mesh da topologia 2B.....	42
Figura 5.21 - Característica do binário da topologia 2B em função da posição.....	43
Figura 5.22 - Característica não linear do coeficiente de indução de uma fase da topologia 2B em função da posição do rotor.....	43
Figura 5.23 - Característica magnética do fluxo da topologia 2B em função da posição do rotor.....	44
Figura 5.24 - Curvas de magnetização da topologia 2B para as posições simuladas.....	44
Figura 5.25 - Topologia 3 no FEMM com materiais definidos.....	45
Figura 5.26 - Mesh da topologia 3.....	46
Figura 5.27 - Característica do binário da topologia 3 em função da posição do rotor.	46
Figura 5.28 - Característica não linear do coeficiente de indução de uma fase da topologia 3 em função da posição do rotor.	47
Figura 5.29 - Característica magnética do fluxo da topologia 3 em função da posição do rotor.....	47
Figura 5.30 - Curvas de magnetização da topologia 3 para as posições simuladas.....	48
Figura 6.1 - Resultado da simulação da topologia 1 na posição alinhada.....	52
Figura 6.2 - Resultado da simulação da topologia 1 na posição alinhada com foco na concentração de fluxo.	53
Figura 6.3 - Resultado da simulação da topologia 1 na posição desalinhada.....	54
Figura 6.4 - Resultado da simulação da topologia 1 na posição desalinhada com foco na concentração de fluxo.	54
Figura 6.5 – Resultado da simulação da topologia 1 na posição de 45 graus.....	55
Figura 6.6 - Resultados da simulação da topologia 1 com valor de corrente superior à figura 6.1.....	55
Figura 6.7 - Resultado da simulação da topologia 2 na posição alinhada.....	59
Figura 6.8 - Resultado da simulação da topologia 2 na posição alinhada com foco na concentração de fluxo.	59
Figura 6.9 - Resultado da simulação da topologia 2 na posição desalinhada.....	60
Figura 6.10 - Resultado da simulação da topologia 2 na posição desalinhada com foco na concentração de fluxo.	60
Figura 6.11 - Resultado da simulação da topologia 2A na posição alinhada.	64
Figura 6.12 - Resultado da simulação da topologia 2A na posição alinhada com foco na concentração de fluxo.	65
Figura 6.13 - Resultado da simulação da topologia 2A na posição desalinhada.	65

Figura 6.14 - Resultado da simulação da topologia 2A na posição desalinhada com foco na concentração de fluxo.	66
Figura 6.15 - Resultado da simulação da topologia 2B na posição alinhada	70
Figura 6.16 - Resultado da simulação da topologia 2B na posição alinhada com foco na concentração de fluxo.	70
Figura 6.17 - Resultado da simulação da topologia 2B na posição desalinhada.....	71
Figura 6.18 - Resultado da simulação da topologia 2B na posição desalinhada com foco na concentração de fluxo.	72
Figura 6.19 - Resultado da simulação da topologia 3 na posição alinhada.	75
Figura 6.20 - Resultado da simulação da topologia 3 na posição alinhada com foco na concentração de fluxo.	76
Figura 6.21 - Resultado da simulação da topologia 3 na posição desalinhada.....	76
Figura 6.22 - Resultado da simulação da topologia 3 na posição desalinhada com foco na concentração de fluxo.	77

Lista de tabelas

Tabela 4.1 - Valores de correntes para os circuitos do estator.....	26
Tabela 6.1 - Resultados do binário para a topologia 1.....	49
Tabela 6.2 - Resultados do fluxo para a topologia 1 parte 1.....	50
Tabela 6.3 - Resultados do fluxo para a topologia parte 2.....	50
Tabela 6.4 - Resultados do coeficiente de indução para a topologia 1.	51
Tabela 6.5 - Resultados do fluxo para a topologia 1 em função da corrente.	52
Tabela 6.6 - Resultados do binário para a topologia 2.....	56
Tabela 6.7 - Resultados do fluxo para a topologia 2.	57
Tabela 6.8 - Resultados do coeficiente de indução para a topologia 2.	57
Tabela 6.9 - Resultados do fluxo para a topologia 2 em função da corrente.	58
Tabela 6.10 - Resultados do binário para a topologia 2A.	61
Tabela 6.11 - Resultados do fluxo para a topologia 2A.....	62
Tabela 6.12 - Resultados do coeficiente de indução para a topologia 2A.	63
Tabela 6.13 - Resultados do fluxo para a topologia 2A em função da corrente.....	63
Tabela 6.14 - Resultados do binário para a topologia 2B.....	67
Tabela 6.15 - Resultados do fluxo para a topologia 2B.	68
Tabela 6.16 - Resultados do coeficiente de indução para a topologia 2B.	68
Tabela 6.17 - Resultados do fluxo para a topologia 2B em função da corrente.	69
Tabela 6.18 - Resultados do binário para a topologia 3.....	73
Tabela 6.19 - Resultados do fluxo para a topologia 3.	74
Tabela 6.20 - Resultados do coeficiente de indução para a topologia 3.	74
Tabela 6.21 - Resultados do fluxo para a topologia 3 em função da corrente.	75

Lista de Siglas e Acrónimos

SynRM – Synchronous Reluctance Motor – Motor de relutância variável

FEMM – método de simulação por elementos finitos

Lista de Símbolos

B_m – Coeficiente de atrito viscoso;

i – Intensidade de corrente elétrica de fase;

i_j – Corrente da fase j ;

i_{ds} – Corrente no eixo direto;

i_{dt} – Corrente que origina binário no eixo direto;

i_{qs} – Corrente no eixo em quadratura;

i_{qt} – Corrente que origina binário no eixo em quadratura;

I_s – Corrente da armadura;

J_m – Momento de inércia;

L – Coeficiente de indução;

L_d – Indutância no eixo direto;

$L_j(\theta, i_j)$ – Coeficiente de indução da fase j em função da posição e corrente da fase j ;

L_q – Indutância no eixo em quadratura;

N – Número de espiras;

p – Número de polos;

R_c – Perdas no núcleo;

R_s – Resistência de fase;

T_e – Binário eletromagnético;

T_L – Binário de carga;

V_d – Tensão no eixo direto;

V_q – Tensão no eixo em quadratura;

ω_r – Velocidade do Rotor;

ξ – Força magnetomotriz;

\mathfrak{R}_d – Relutância do circuito magnético do entreferro;

\mathfrak{R}_r – Relutância do circuito magnético do rotor;

\mathfrak{R}_s – Relutância do circuito magnético do estator;

ϕ – Fluxo magnético produzido por uma fase;

ψ_j – Fluxo magnético da fase j;

θ – Ângulo máximo de controlo de binário.

1 Introdução

Esta tese irá mostrar como a estrutura do rotor influencia as características de uma máquina síncrona de relutância variável (*SynRM*), mais especificamente, como influencia a característica de binário, de fluxo e do seu coeficiente de indução. Serão apresentadas simulações desenvolvidas através de um software baseado no método de elementos finitos de análise dos campos magnéticos, denominado por *FEMM*, de uma máquina *SynRM*.

Primeiramente, são apresentadas a constituição física da máquina, o princípio de funcionamento e as características principais de um *SynRM*. É apresentado também um esquema equivalente da máquina, seguido das equações que definem o modelo matemático. Foram inicialmente estudados inicialmente três topologias de estrutura de rotor. No entanto, após executar as simulações para as três topologias, verificou-se que seria interessante fazer variações da topologia 2 uma vez que apresentava valores de binário mais elevados, ficando assim o estudo desenvolvido com cinco topologias de estrutura de rotor da *SynRM*.

Após definir quais as estruturas a analisar, são apresentados os resultados da simulação dessas topologias, ou seja, as curvas de característica do binário, assim como as curvas da característica de fluxo e de coeficiente de indução. Também é apresentado um conjunto de figuras do corte da máquina em diferentes posições angulares do rotor. As posições escolhidas para a análise de influência da estrutura do rotor são correspondentes à posição de menor relutância magnética e outra posição que apresenta menor circulação de fluxo (relutância magnética de valor superior ao mínimo). Este conjunto de figuras complementa os resultados comparativos das características da máquina. Após visualização dos resultados, verifica-se que a topologia 2 é a mais vantajosa em termos de binário máximo fornecido e que a topologia 2A apresenta melhor circulação de fluxo dos modelos estudados.

Espera-se que os resultados obtidos indiquem ou não, se as dimensões das barreiras de fluxo influenciam o desempenho da máquina de forma significativa, assim como o aumento do número dessas barreiras.

Esta dissertação está estruturada em 8 capítulos.

O Capítulo 1 introduz o tema da dissertação, o que se pretende analisar assim como os métodos que foram utilizados.

No Capítulo 2 é apresentada uma breve introdução histórica sobre a máquina de relutância variável e uma comparação sintética com a máquina de indução.

O Capítulo 3 apresenta a teoria associada à máquina de relutância variável, para melhor compreender o seu funcionamento básico e as suas características principais.

O Capítulo 4 define as topologias de rotor a serem analisadas no capítulo seguinte.

O Capítulo 5 apresenta os resultados das simulações das topologias assim como o procedimento para analisar os modelos.

O Capítulo 6 apresenta uma análise comparativa entre os resultados obtidos das simulações realizadas.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões acerca do trabalho desenvolvido, algumas considerações finais acerca dos resultados e opiniões em relação a trabalhos futuros.

2 Introdução da Máquina

Os motores elétricos são usados em várias áreas da indústria, sendo por isso essencial que esses motores sejam eficientes.

Este motor já existe desde 1982, no entanto, na altura não existiam meios de arranque e controlo do motor, tendo sido menosprezado face a outras máquinas já existentes, tais como a de indução ou de corrente contínua. Porém na atualidade, com o uso de conversores estáticos de velocidade, esse problema já não existe. Por volta da mesma altura do aparecimento dos *SynRM*, também apareceram os motores de magnetos permanentes que tomaram toda a atenção que poderia ter sido dada ao motor síncrono de relutância magnética variável [7].

É reconhecido que o motor síncrono de relutância variável é mais eficiente que o motor assíncrono, pelo simples facto de que este último apresenta perdas por efeito de joule no rotor de 20 a 35 %. Estas perdas não se verificam num motor de relutância variável síncrono [3].

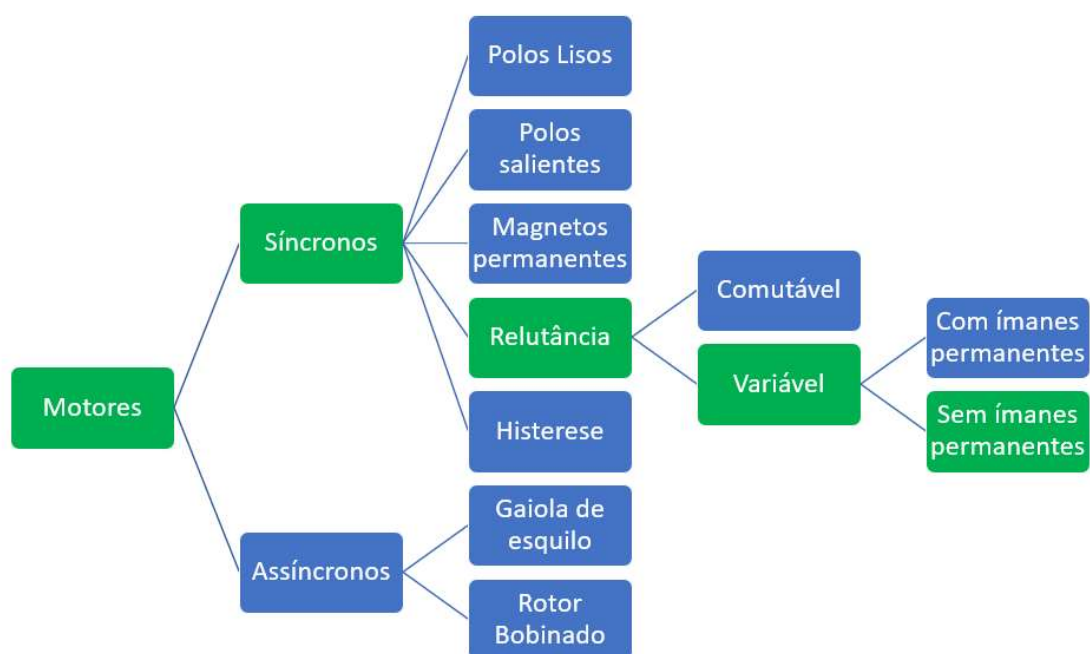


Figura 2.1 - Classificação de motores segundo [14].

Os motores síncronos podem ser de magnetos permanentes ou de relutância magnética, sendo que dentro dos motores de relutância magnética, existem os motores de relutância magnética comutável e os de relutância magnética variável. O motor síncrono de relutância magnética variável é o objeto de estudo desta dissertação.

Os motores de indução, são os mais utilizados mundialmente na indústria, devido aos baixos custos e à robustez da máquina [16] [1]. No entanto, segundo Boglietti [1], quando é necessário efetuar regulação de velocidade, outros motores são a melhor escolha para o trabalho, sendo um desses motores o *SynRM*. Este motor possui algumas vantagens face aos motores de indução, como por exemplo, o menor custo, a ausência de perdas no rotor, maior binário, rotor sem problema de sobreaquecimento [19], entre outras.

O *SynRM* pode apresentar maiores valores de poupança de energia relativamente a outras máquinas clássicas, consequentemente com menores emissões de CO₂. Em virtude do rotor não dissipar potência calorífica, torna-se mais fácil arrefecer o estator da máquina.

Este tipo de motor, beneficia bastante quando equipado com um controlador para manter o ângulo de carga dentro dos limites de funcionamento do motor [7]. No entanto, o motor sem controlador, não pode funcionar de forma mais correta [12], sendo por isso o controlador um elemento necessário para o melhor funcionamento.

Capítulo 3

Este capítulo introduz a máquina, o seu funcionamento e as suas características genéricas. Também apresenta um modelo matemático para se caracterizar o comportamento da máquina.

3 Enquadramento Teórico

3.1 Constituição da Máquina

A constituição de um motor *SynRM* é genericamente semelhante às restantes máquinas na medida em que possui uma carcaça, um estator e um rotor, com exceção de não existirem enrolamentos no rotor.

Os *SynRM* podem ser constituídos de várias formas, com ou sem barreiras, com ou sem polos salientes [12].

O estator é composto por um núcleo laminado de chapas ferromagnéticas, de forma a reduzir as perdas por histerese e correntes parasitas [13].

O rotor cilíndrico não possui enrolamentos, sendo composto por um material ferromagnético com uma determinada estrutura interna que origina uma variação de relutância magnética no rotor. Essa variação de relutância é possível devido às barreiras de fluxo inseridas na estrutura interna do rotor.

O rotor deve de ter uma estrutura interna de forma que a relutância magnética seja mínima no eixo direto e que, também, possua relutância máxima no eixo de quadratura. Sendo o objetivo principal criar dificuldade de circulação ao fluxo.

Existem diversos tipos de estrutura do rotor [13] [9] como o rotor de barreiras de fluxo (figura 3.2) ou o rotor axial laminado (figura 3.1).

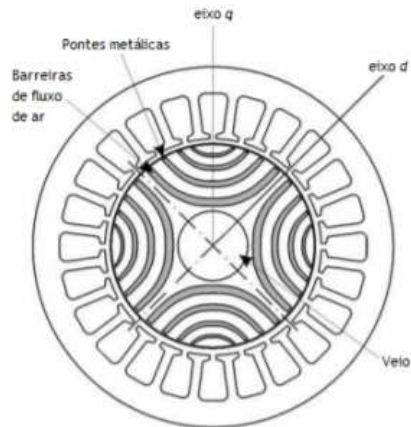


Figura 3.2 - Rotor de barreiras de fluxo (retirado de [13])

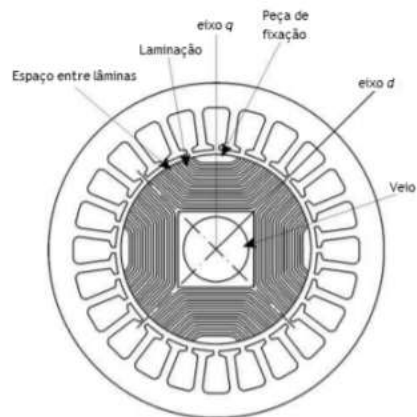


Figura 3.1 - Rotor axial laminado (retirado de [13])

3.2 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento de um *SynRM* baseia-se na variação da relutância magnética. A máquina é alimentada no estator, por um sistema trifásico equilibrado, é de seguida originado um campo girante e ocorre a magnetização do rotor [13]. No rotor, os polos serão induzidos alternadamente. Com a magnetização do rotor, o sentido de menor relutância, ou seja, o eixo direto, irá alinhar-se com o campo aplicado pelo estator, para minimizar a relutância magnética no circuito. Ou seja, um binário é produzido sempre que o vetor campo aplicado e o sentido de menor relutância magnética não estejam alinhados. Logo, o binário depende muito das relutâncias do eixo direto e do eixo de quadratura. Então, quanto maior for a diferença de reactâncias entre esses eixos, maior será o valor do binário produzido. Quando os polos do estator e do rotor estão alinhados, a relutância é mínima e constante, e quando os polos estão numa posição em quadratura, a relutância é máxima e constante [17].

Apesar do campo magnético gerado pelo estator e o eixo direto do rotor girarem em sincronismo, vai existir sempre um desfasamento denominado por ângulo de carga (representado por δ na figura 3.3). E este ângulo de carga é dependente da inércia mecânica do motor e do binário resistente aplicado.

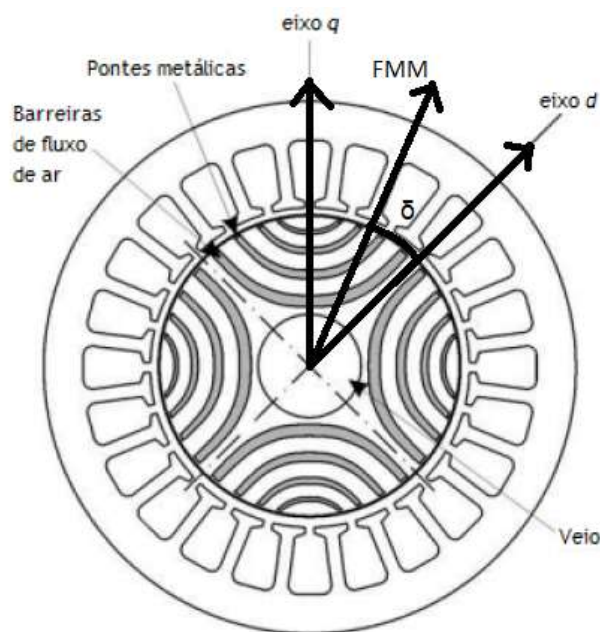


Figura 3.3 – Exemplo de rotor de barreiras de fluxo (alterado a partir de [13])

Sendo que o campo magnético no entreferro é produzido única e exclusivamente pelo estator, quer dizer que o motor irá absorver uma corrente reativa mais elevada [13]. Segundo Matos

[13], a corrente reativa tem impacto direto no fator de potência, pois quanto menor for a razão entre as reactâncias do eixo d e do eixo q , menor será esse fator [13].

SynRM é um motor síncrono, no entanto não consegue arrancar de forma síncrona, sendo por isso necessário efetuar um arranque assíncrono [12]. Este arranque, no entanto, não pode ser repentino devido à inércia do motor que não permitirá que o rotor alcance grandes velocidades de forma repentina [6]. Caso se tentasse efetuar um arranque à máxima velocidade, ia-se verificar que o motor ia parar momentos depois de se ter iniciado o arranque. Porque o motor não consegue acompanhar o campo girante gerado pelo estator. A solução para este problema, seria iniciar em velocidades mais baixas e ir aumentando gradualmente e isto tudo terá de ser feito através do uso de um controlador [6]. Este controlador também controla o ângulo de carga. Caso o ângulo de carga ultrapasse o ângulo crítico (implica perda de sincronismo), devido ao aumento de carga, o controlador deve de tomar medidas para reduzir a velocidade do motor para diminuir o ângulo de carga.

Com a ausência de enrolamentos no rotor, deixa de existir perdas por efeito de joule no rotor que, por consequência, origina menores temperaturas de funcionamento do mesmo. Em contrapartida, existe um aumento de perdas no estator devido a maiores correntes que lá circulam.

Mesmo com um aumento ligeiro das perdas no estator, esta máquina continua a apresentar rendimentos mais elevados do que a máquina de indução como se verifica na figura 3.4 [13].

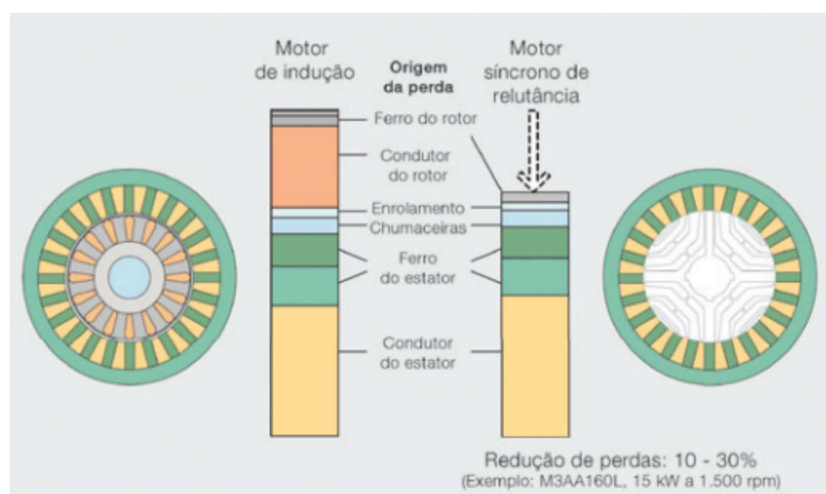


Figura 3.4 - Perdas de potência num motor de indução e num motor de relutância variável (retirado de [13]).

Como apenas existem enrolamentos no estator, só existirá indutância de fugas no estator [13]. Este fluxo de dispersão é devido às ranhuras das bobinas dos enrolamentos, no entanto, estas

indutâncias de fugas não interferem significativamente no funcionamento da máquina. Outras perdas que existem são as perdas por correntes de Foucault e perdas por histerese que ocorrem nos núcleos ferromagnéticos do *SynRM*. Sendo as perdas por correntes de Foucault, as perdas provocadas por correntes induzidas nos materiais que compõem o *SynRM*, quando este está sujeito a um fluxo magnético originada do estator. As perdas por histerese são causadas pela energia utilizada na orientação dos domínios magnéticos dos materiais que compõem os núcleos ferromagnéticos. Estas perdas podem causar um impacto significativo no desempenho da máquina. Para diminuir estes riscos, deve-se ter em atenção aos aspetos construtivos da máquina [13]. Quando existe uma ligeira oscilação de binário, é consequência da interação entre o rotor e as ranhuras do estator e esta oscilação influencia o desempenho do motor. No entanto este impacto pode ser reduzido com recurso a uma melhor projeção das barreiras de fluxo do rotor.

Outro aspeto que pode influenciar o funcionamento da máquina é a saturação magnética. A saturação depende da não linearidade do material ferromagnético da estrutura do rotor. Outro fator que influencia a saturação magnética é a composição de materiais das barreiras de fluxo na estrutura do rotor.

3.3 Aplicações

As propriedades eletromecânicas do *SynRM* e o seu elevado rendimento para regimes de funcionamento diferentes da nominal, tornam este motor apropriado para várias aplicações. É utilizado como sistemas de conversão de energia em várias indústrias, como por exemplo, nas indústrias alimentares, na indústria química, na indústria têxtil, nas explorações mineiras, entre outras.

No caso da indústria alimentar, estes motores podem ser encontrados misturadores (exemplificado na figura 3.5), máquinas de engarrafamento e rotulagem [13].



Figura 3.5 - Aplicação de SynRM num misturador industrial (retirado de [13]).

Na indústria têxtil, são utilizados em todos os tipos de máquina [13] para o tratamento de fios e tecidos de acabamento, como máquinas de torção e texturização [13] como exemplificado na figura 3.6.



Figura 3.6 - Aplicação de SynRM na indústria têxtil (retirado de [13]).

Estes motores também podem ser utilizados em mobilidade elétrica, mais especificamente, nos veículos de turismo da marca Tesla [6].

3.4 Características da Máquina

3.4.1 Modelo

Para se poder prever regimes de funcionamento do motor, é necessário o uso de um modelo matemático. Este modelo deve ser usado para caracterizar o comportamento da máquina. Este modelo usa a teoria de Blondel, das duas reactâncias como o das máquinas síncronas mais comuns. Uma exceção é que o binário produzido é devido à relutância do circuito magnético do rotor.

Segundo Huann-Keng Chiang [8], o esquema equivalente das figuras 3.7.A e 3.7.B, representa o eixo direto e eixo em quadratura, respetivamente, da máquina. A corrente de armadura que circula no estator, é decomposta em i_{ds} e i_{qs} [8], segundo o eixo direto e em quadratura. A resistência R_s representa o enrolamento de fase da armadura. A resistência R_c representa as perdas no núcleo ferromagnético [13]. Em paralelo com essa resistência, estão representadas as forças contra eletromotriz do eixo direto ($-\omega_r L_q i_{qt}$, figura 3.7.A) e do eixo em quadratura ($\omega_r L_d i_{dt}$, figura 3.7.B). Em série com essas forças estão representados os coeficientes de autoindução L_d e L_q . A corrente i_{ds} representa a corrente no eixo direto e i_{qs} a corrente no eixo em quadratura. Sendo i_{dt} a corrente que origina o binário no eixo direto e i_{qt} a corrente que origina o binário no eixo em quadratura.

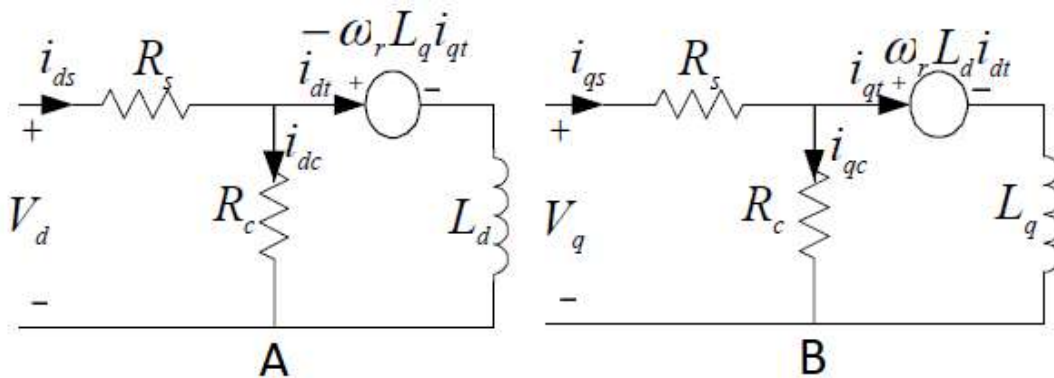


Figura 3.7 - Circuito equivalente da SynRM com perdas no núcleo - A representa o eixo direto e B eixo em quadratura (retirado de [8])

As expressões para as tensões da figura 3.7 A e B, V_d e V_q são as seguintes [21] [8]:

$$V_d = R_s i_{ds} - \omega_r L_q i_{qt} + L_d \frac{di_{dt}}{dt} \quad (3.1)$$

$$V_q = R_s i_{qs} + \omega_r L_d i_{dt} + L_q \frac{di_{qt}}{dt} \quad (3.2)$$

O binário eletromagnético produzido pelo motor é dado pela seguinte equação [8]:

$$T_e = \frac{3}{4} p (L_d - L_q) i_{dt} i_{qt} \quad (3.3)$$

Pela expressão 3.3 pode-se deduzir que o binário eletromagnético não depende do sentido da corrente do sistema trifásico, mas sim da sua amplitude.

O binário eletromecânico é dado pela expressão 3.4 [8]:

$$T_e - T_L = J_m \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \omega_r \quad (3.4)$$

Como é difícil medir as perdas no núcleo (R_c) em regime transitório, ignora-se a indutância de transitório em regime estacionário. Como as correntes i_{dt} e i_{qt} , não podem ser medidas, necessitam de ser calculadas através das expressões 3.5 e 3.6 [8].

$$i_{ds} = i_{dt} - \frac{1}{R_c} (\omega_r L_q i_{qt}) \quad (3.5)$$

$$i_{qs} = i_{qt} + \frac{1}{R_c} (\omega_r L_d i_{dt}) \quad (3.6)$$

Substituindo nas expressões das tensões 3.1 e 3.2, obtemos as expressões 3.7 e 3.8 [8]:

$$V_d = R_s i_{dt} - \omega_r \left(1 + \frac{R_s}{R_c}\right) L_q i_{qt} + L_d \frac{di_{dt}}{dt} \quad (3.7)$$

$$V_q = R_s i_{qt} + \omega_r \left(1 + \frac{R_s}{R_c}\right) L_d i_{dt} + L_q \frac{di_{qt}}{dt} \quad (3.8)$$

Pelas expressões 3.5 e 3.6, sabemos que $i_{ds} \neq i_{dt}$ e que $i_{qs} \neq i_{qt}$. Então tendo [8]:

$$\delta = \tan^{-1} \frac{i_{qs}}{i_{ds}} \quad (3.9)$$

Onde δ é o ângulo de máximo do binário de carga. É possível obter outra expressão de binário [8]:

$$T_e = \frac{3}{4} p (L_d - L_q) R_c^2 \left[\frac{(R_c + \omega_r L_q \tan \delta)(R_c \tan \delta - \omega_r L_d)}{(1 + \tan^2 \delta)(R_c^2 + \omega_r^2 L_d L_q)^2} \right] I_s^2 \quad (3.10)$$

Sendo que I_s representa a corrente de armadura que é possível obter através da expressão 3.11 [8]:

$$I_s = \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2} \quad (3.11)$$

3.4.2 Característica magnética

Quando uma das fases da máquina é excitada, irá estabelecer-se uma força magnetomotriz que por si origina um fluxo magnético. Segundo a Lei de Hopkinson, a relação entre o fluxo magnético e a força magnetomotriz, depende da relutância do caminho do fluxo magnético. Sendo dada essa relação pela expressão 3.12 [17]:

$$\mathcal{F} = (\mathfrak{R}_s + \mathfrak{R}_d + \mathfrak{R}_r)\phi \quad (3.12)$$

Onde:

\mathfrak{R}_d – Relutância do circuito magnético do entreferro;

\mathfrak{R}_r – Relutância do circuito magnético do rotor;

\mathfrak{R}_s – Relutância do circuito magnético do estator;

ϕ – Fluxo magnético produzido por uma fase.

Segundo Gonçalves [7], o caminho do fluxo magnético no estator e no rotor é praticamente constante, no entanto o caminho do fluxo magnético no entreferro não é o mesmo. Não tendo em conta a saturação magnética, R_s e R_r assumem valores constantes.

Devido às barreiras existentes no rotor, o fluxo tem determinados caminhos que pode percorrer. Quando esses caminhos são mais curtos, ou seja, quando o rotor está alinhado com o estator, a relutância vai ser menor. Porém, com a rotação do rotor, os caminhos de fluxo vão se alterar como consequência da existência das barreiras, o que provocará um aumento de relutância e consequentemente uma diminuição de fluxo. Sendo a permeabilidade magnética do ar inferior à permeabilidade magnética do material do estator e do rotor, assumindo a inexistência de saturação magnética, R_s e R_r serão bastante inferiores a R_d . Nesta situação pode-se reduzir a expressão 3.12 de modo que a relutância total seja apenas dada por R_d . Então, para uma dada força magnetomotriz, o fluxo que se gera quando os caminhos de fluxo do rotor estão alinhados com os polos, é superior ao fluxo que se gera quando o inverso acontece. Sendo que a força magnetomotriz produzida por uma fase é dada pela expressão 3.13 [7]:

$$\mathcal{F} = Ni \quad (3.13)$$

Onde N representa o número de espiras no enrolamento de fase e i representa a intensidade da corrente elétrica da fase.

Segundo Rafael [17], o fluxo é máximo quando a máquina estiver na posição alinhada, para uma determinada intensidade de corrente. Esta afirmação pode ser observada na figura 3.8 onde é

relacionado a intensidade de corrente de fase com o fluxo produzido, para as posições alinhada e desalinhada.

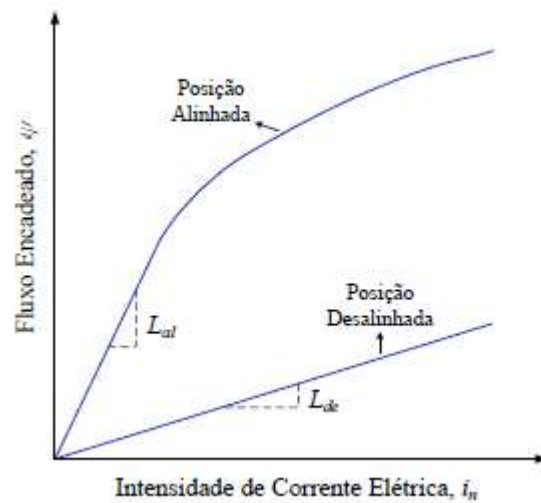


Figura 3.8 – Curvas de magnetização nas posições alinhada e desalinhada (retirado de [7])

Pode-se observar também na figura 3.8 (onde, L_{al} – indutância alinhada, L_{de} – indutância desalinhada), que à medida que a corrente aumenta, o fluxo também aumenta, porém, esse aumento pode não ser proporcional como se verifica para a posição alinhada. Esse facto deve-se à saturação magnética dos núcleos ferromagnéticos, que provoca uma diminuição da permeabilidade magnética dos mesmos levando ao aumento de R_s e R_r . Deixando assim R_s e R_r de ser desprezáveis face a R_d [7].

Para a posição desalinhada, devido à elevada relutância magnética do entreferro, não ocorre saturação magnética. As restantes posições que o rotor pode ter entre a posição alinhada e desalinhada, seriam expressas entre as curvas dessas posições, sendo que as mesmas serão cada vez mais próximas das curvas das limite (logo após a posição desalinhada, ainda deverá continuar a ser uma reta, tomando ao longo da mudança de posição o formato da curva da posição desalinhada).

Para perceber o comportamento do fluxo face ao posicionamento do rotor, é necessário recorrer à característica magnética genérica representada pela figura 3.9, onde a seta representa o sentido ascendente de valor da corrente. Pode-se observar o comportamento do fluxo ao longo das diferentes posições. Assim como já tinha sido documentado, o ponto de maior valor de fluxo será para a posição alinhada, visto que o fluxo terá maior facilidade de circulação [17]. Note-se que à medida que se afasta da posição alinhada, que o valor do fluxo tende a diminuir, podendo chegar mesmo a um valor quase nulo. Pela figura 3.9 também se verifica que

com aumento de corrente, aumenta consequentemente o valor de fluxo [12], sendo este sempre superior ao valor de fluxo de uma corrente de valor inferior.

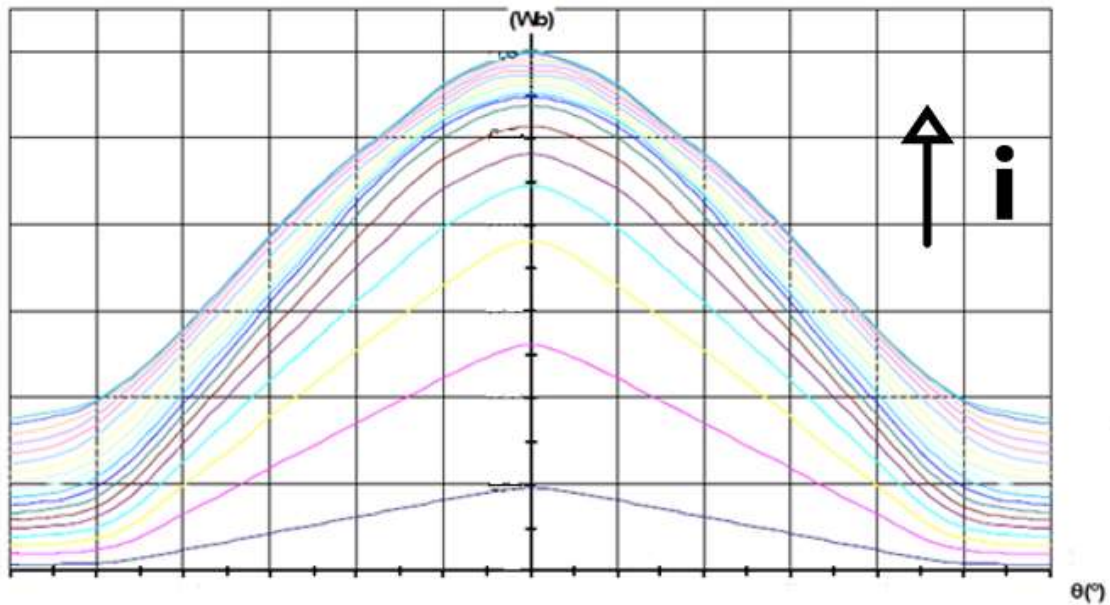


Figura 3.9 - Característica magnética genérica com o Fluxo em função da posição do rotor (retirado de [17]).

3.4.2.1 Indutância

As curvas de magnetização permitem o cálculo da indutância própria da fase, sendo dada pela expressão 3.14 [7]:

$$L = \frac{N\phi}{i} \quad (3.14)$$

Tendo em atenção à expressão 3.14, pode-se concluir que a indutância depende da posição angular do rotor e da intensidade de corrente de fase. Logo, essa indutância não é linear, visto que o seu aumento ou diminuição varia bastante consoante a sua posição e corrente, como observado no exemplo da figura 3.10 [17] [12].

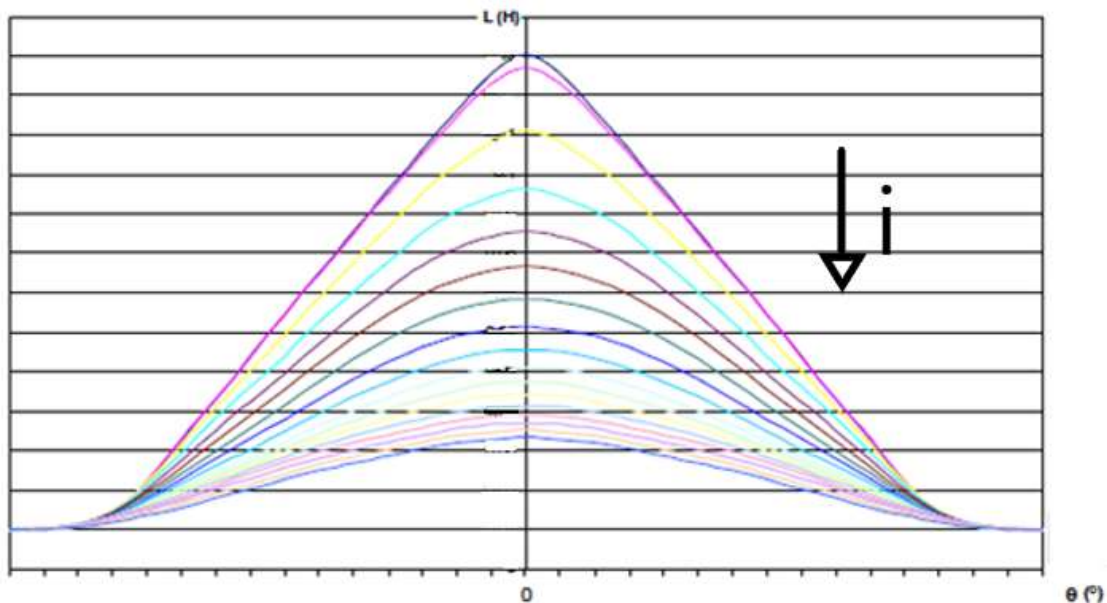


Figura 3.10 - Característica genérica não linear do Coeficiente de indução de uma fase em função da posição do rotor (retirado de [17]).

Como se pode observar na figura 3.10, existem 4 regiões da característica do coeficiente de indução genérica da máquina.

A primeira região, é a região para um L mínimo (próximo de zero) de valor aproximadamente constante e que implicará binário nulo, caso exista corrente na fase, de acordo com Rafael [17].

A segunda região, é a região onde existe uma subida no coeficiente de indução L . Nesta fase a corrente elétrica irá produzir um binário. Nesta região é quando a máquina está a circular no sentido direto de rotação e é onde a máquina faz o seu funcionamento normal.

A terceira região, é a região onde L assume um valor máximo e aproximadamente constante e não ocorrerá produção de binário se a fase estiver excitada.

A quarta região é semelhante à segunda região em termos de ocorrer uma variação de coeficiente de indução, no entanto, nesta região, é onde existe uma travagem de velocidade ou então uma inversão de sentido de rotação.

Esta característica não linear pode ser obtida através da expressão 3.15 que é semelhante à expressão 3.15 [17]:

$$L_j(\theta, i_j) = \frac{\psi_j(\theta, i_j)}{i_j} \quad (3.15)$$

Onde:

$L_j(\theta, i_j)$ – Coeficiente de indução da fase j em função da posição e corrente da fase j ;

ψ_j – Fluxo magnético da fase j .

3.4.3 Característica do Binário

Para se perceber o comportamento desta máquina em plena rotação, é necessário entender a característica do Binário. Característica de binário este que varia consoante a posição do rotor como demonstrado pela figura 3.11 que é uma característica genérica das curvas de binário [17] [12]. Para se obter o binário estático da máquina, pode-se recorrer a dois métodos, o cálculo analítico ou através de um método experimental.

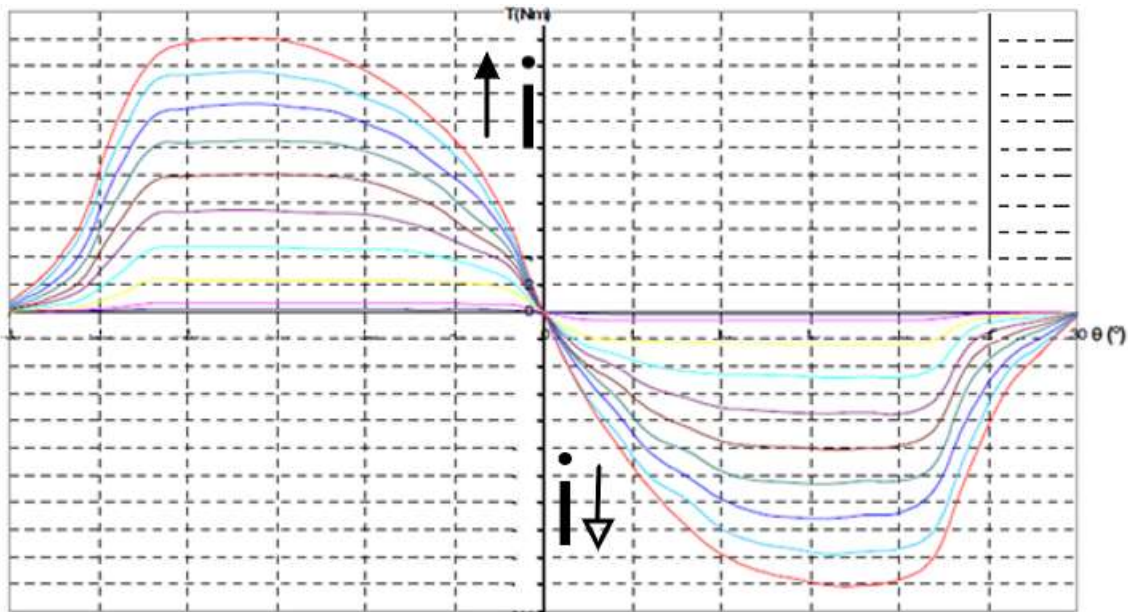


Figura 3.11 – Característica genérica do binário em função da posição do rotor (retirado de [17] e comprovado por Martins [12]).

A característica genérica do binário estático apresenta duas fases distintas [17], uma fase onde o binário é positivo e outra onde o binário é negativo. Isto pode ser justificado com a necessidade de ajuste de posição por parte do rotor face ao estator. Ou seja, estando o rotor desalinhado com o estator, vai existir uma força (um binário) que vai tentar alinhar o rotor com o estator e esse binário tanto pode ser positivo como negativo, dependendo da posição do rotor.

Em termos físicos, um binário positivo pode proporcionar um movimento angular do veio no sentido direto e um binário negativo, um movimento angular no sentido inverso.

Capítulo 4

Neste capítulo são apresentadas as topologias a serem analisadas, os seus constituintes e as suas diferenças.

4 Estruturas a analisar

O objetivo desta dissertação é analisar a influência da estrutura do rotor nas características do motor. Então, para esse efeito, foram criadas três topologias de estrutura do rotor análise do *SynRM*, mantendo toda a distribuição dos enrolamentos do estator constante, para todas as topologias. Estas topologias geométricas são utilizadas num software de elementos finitos, programa denominado de *FEMM*. Este software possibilita a resolução de problemas planares (em duas dimensões) e problemas magnéticos de baixa frequência em sistemas de com eixos simétricos. O *FEMM* foi utilizado para calcular a distribuição de fluxo, a sua amplitude e assim como a amplitude do binário total. Logo, foi necessário importar o desenho previamente feito em *AutoCAD*, definir os materiais a usar, as correntes no estator e o que cada forma representa no desenho. Todas as topologias possuem 2 pares de polos.

Foi necessário definir circuitos no estator para se efetuar a simulação. Foram definidos 3 circuitos, o circuito 1 que representa a primeira fase, o circuito 2 que representa a segunda fase, o circuito 3 que representa a terceira fase. Cada enrolamento é composto por duas bobines diametralmente opostas ligadas em série com oposição do sentido de corrente, uma relativamente à outra. Sendo os circuitos -1, -2 e -3 os circuitos com polaridade inversa.

Os valores de correntes para cada circuito estão apresentados na tabela 4.1, estando a negrito a fase que foi usada como referência nas simulações.

Tabela 4.1 - Valores de correntes para os circuitos do estator.

Fase 1	Fase 2 (120°)	Fase 3 (-120°)
1 A	-9 A	8 A
1.8 A	-9.2 A	7.3 A
3.11 A	-9.48 A	6.37 A
3.9 A	-9.66 A	5.72 A
5.186 A	-9.94 A	4.75 A
6 A	-10 A	4.09 A

4.1 Topologia 1

A topologia 1 está apresentada na figura 4.1. Esta topologia foi a escolhida entre diversas outras, sendo o formato das barreiras a mesma para todas as estruturas. As barreiras mais internas são maiores em termos de dimensão que as barreiras mais exteriores.

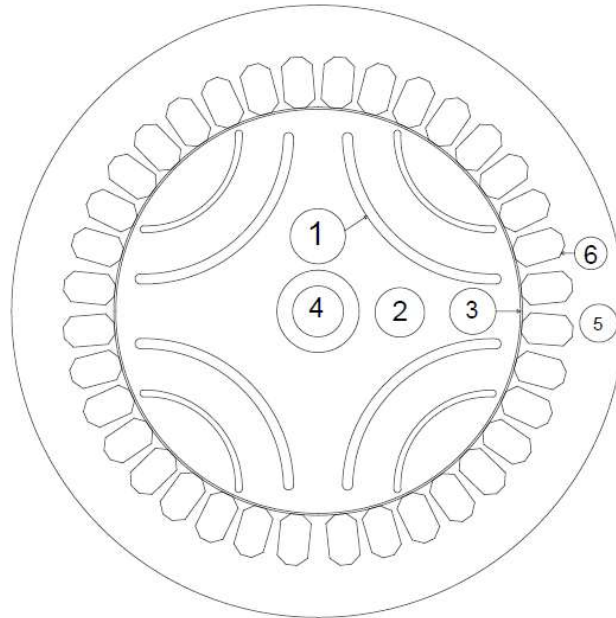


Figura 4.1 - topologia 1 da máquina.

Na figura 4.1, os números representam partes do motor, sendo:

- 1 – Barreira de fluxo;
- 2 – Rotor;
- 3 – Entreferro;
- 4 – Núcleo do Rotor;
- 5 – Estator;
- 6 – Cavas das fases.

Sendo posteriormente, nas simulações, definidos os materiais para cada parte do motor. Todos os modelos apresentados são compostos pelas partes apresentadas na topologia 1.

4.2 Topologia 2

O topologia 2 (figura 4.2), é idêntica à topologia 1 em termos de formato, no entanto foi aumentado a grossura das barreiras, que implica que o espaçamento no eixo direto foi diminuído, para verificar como isso influencia o comportamento da máquina. Esta topologia é composta pelos mesmos materiais da topologia 1 e o estator não sofreu qualquer tipo de alteração.

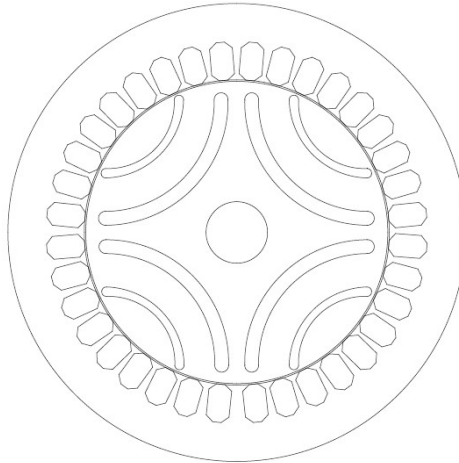


Figura 4.2 - Topologia 2 da máquina.

4.3 Topologia 3

A topologia 3 (figura 4.3), é semelhante à topologia 1, com a exceção de existir mais uma barreira de fluxo para limitar ainda mais a circulação de fluxo. A barreira inserida nesta topologia possui maiores dimensões que a barreira exterior, mas menores que a barreira interior. Mantendo assim relação entre cada barreira, ou seja, as barreiras mais perto do interior serão as maiores e as seguintes barreiras serão menores à medida que se afastam do centro do rotor.

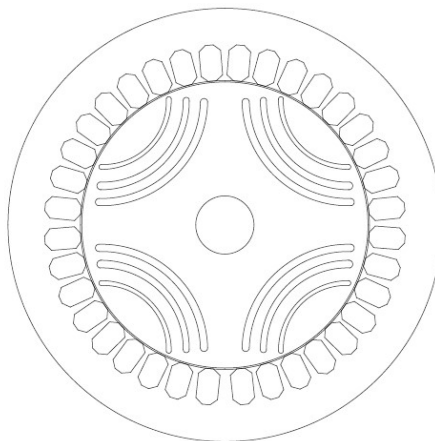


Figura 4.3 - Topologia 3 da máquina.

Capítulo 5

Neste capítulo são apresentadas as simulações, assim como o procedimento das mesmas. É também apresentado os materiais que compõem cada topologia.

5 Simulações das topologias

O processo de simulação é composto por 3 etapas. Uma primeira etapa, onde é definido o desenho a analisar, os componentes presentes no mesmo, assim como as suas dimensões, os circuitos existentes e os valores de correntes dos mesmos. Nesta etapa também é necessário definir os limites do desenho para o software perceber onde cada componente acaba e onde é o exterior da máquina. A segunda etapa do processo de simulação, é a simulação em si. O programa preenche o desenho fornecido com pequenos triângulos, criando assim uma *mesh*. Em seguida o programa irá efetuar todos os cálculos para cada triângulo no desenho. A terceira etapa de simulação, consiste em analisar e tratar os resultados das simulações. O programa ilustra o comportamento do fluxo da máquina, assim como as zonas de foco do mesmo. Nestas simulações não foi tido em conta o regime transitório da máquina uma vez que o programa não permite simular a máquina em movimento. Portanto, todos os resultados apresentados são valores instantâneos.

5.1 Topologia 1

Através do *FEMM*, foi possível obter a figura 5.1, onde já estão representados todos os materiais usados. Sendo que nas cavas estão enrolamentos de cobre de secção 0.82 mm^2 com *max current* de 11A (18 AWG). Para todas as simulações, foram usadas 850 espiras. Como material condutor, foi escolhido o material M-45 *Steel*, utilizado genericamente em máquinas elétricas, que é um material ferromagnético liso feito de aço de silicioso. Para as barreiras de fluxo e para o núcleo do rotor, o material escolhido foi o aço 316 (*Stainless Steel*) que é um material sólido não magnético de aço.

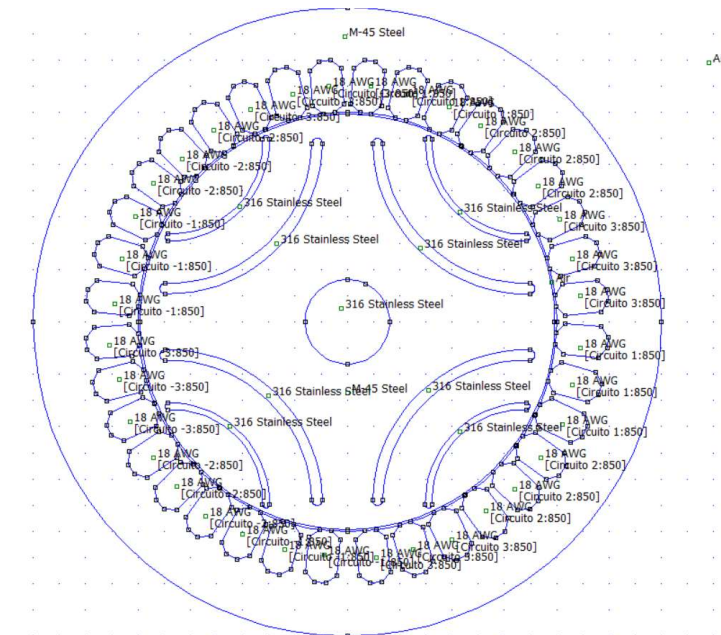


Figura 5.1 - Topologia 1 no FEMM com materiais definidos.

A figura 5.2 demonstra uma fase da simulação da topologia 1, onde se observa uma *mesh* criada pelo FEMM (conjunto de pequenas áreas a amarelo nas figuras do capítulo 5). Esta *mesh* é mais concentrada nas zonas de maior concentração de materiais, de forma a conseguir efetuar todas as simulações de forma mais exata. A *mesh* pode ser configurada para efetuar mais cálculos ou menos cálculos, sendo que isso influencia o tempo de simulação do programa.

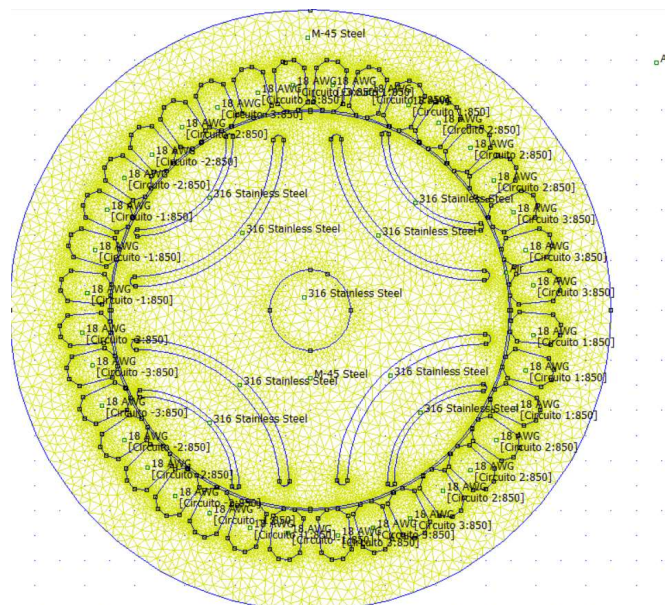


Figura 5.2 - Mesh da topologia 1.

A partir do FEMM foi possível obter a característica do binário representada na figura 5.2. Nesta simulação, foram colocados os valores das correntes nos circuitos respetivos. Em seguida, foi

feito a simulação para posições predefinidas. Ou seja, iniciava-se a simulação na posição alinhada e após a simulação estar concluída, o rotor iria rodar para outra posição predefinida e assim sucessivamente até se alcançar a posição desalinhada. Os valores que originaram a figura 5.3 estão na tabela 6.1.

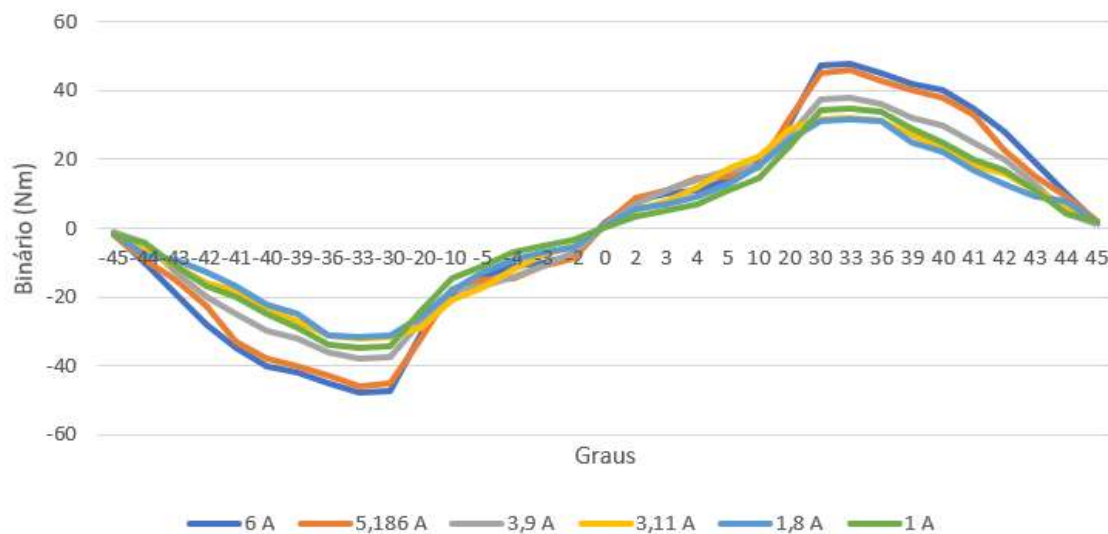


Figura 5.3 - Característica do binário da topologia 1.

As curvas representadas na figura 5.3, representam a curva de binário para cada valor de corrente de referência e para cada posição do rotor da topologia 1. Como se observa na figura 5.3, os resultados a partir da posição alinhada até a posição -45, é um espelho do comportamento da curva de 0 a 45 graus, mas no sentido inverso.

No caso da simulação do fluxo e do coeficiente de indução, apenas uma das fases se encontra com valor não nulo (fase 1) os valores de fluxo e da indução, de fase para fase, não varia muito. O processo de simulação para estas características foi o inverso do processo para a característica dos binários. Neste processo, colocava-se o rotor na posição alinhada e para cada simulação alterava-se o valor da corrente de forma a representar uma variação da mesma para ir de encontro à expressão 3.15. Foram obtidos os valores das tabelas 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5, que estão representados nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6.

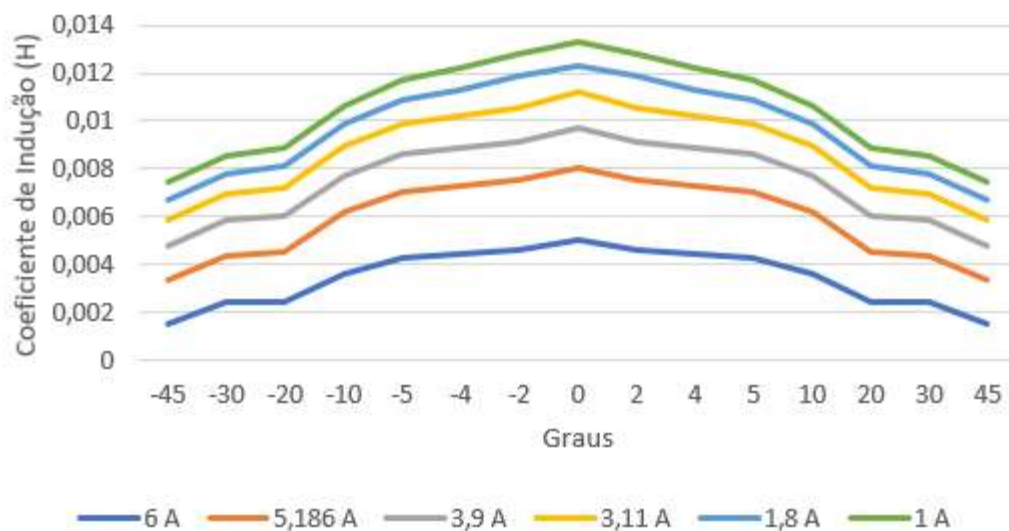


Figura 5.4 - Característica não linear do coeficiente de indução de uma fase da topologia 1 em função da posição do rotor.

A figura 5.4, representa o comportamento do coeficiente de autoindução ao longo de várias posições do rotor da topologia 1. Sendo que cada curva representa um valor de corrente da fase 1.

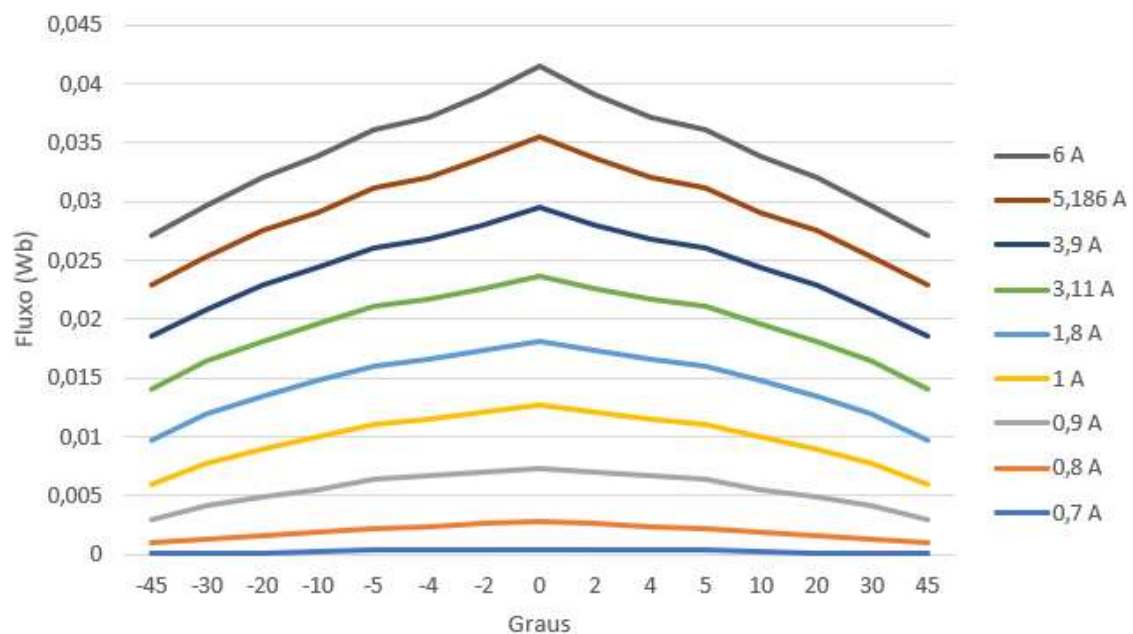


Figura 5.5 - Característica magnética do fluxo da topologia 1 em função da posição do rotor.

A figura 5.5, é semelhante à figura 5.4, no entanto o comportamento do fluxo é inverso ao comportamento do coeficiente de indução. Cada curva representa o comportamento do fluxo para cada valor de corrente ao longo das várias posições do rotor da topologia 1.

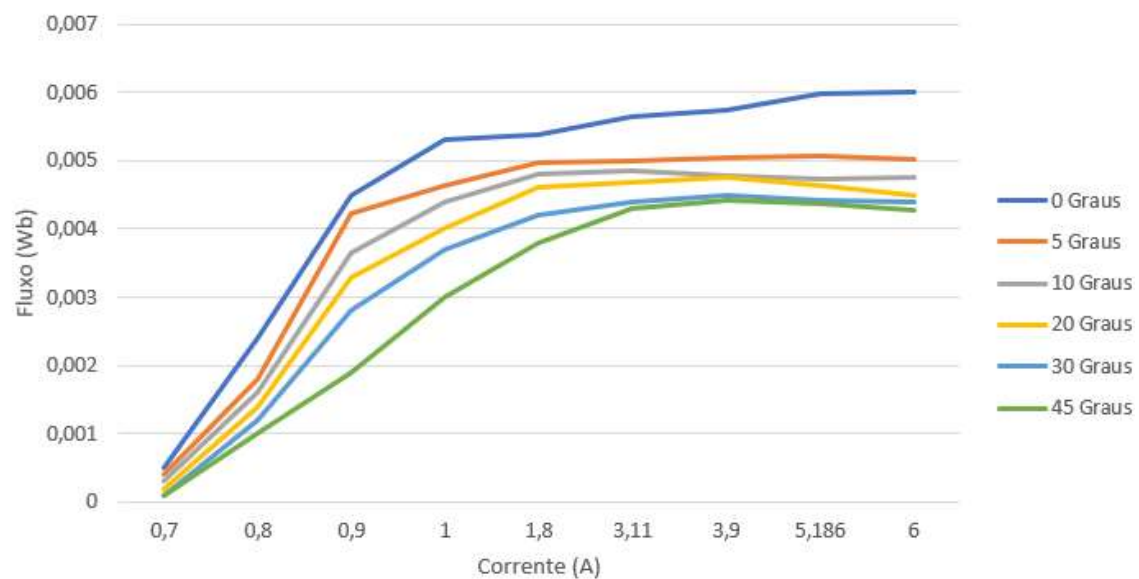
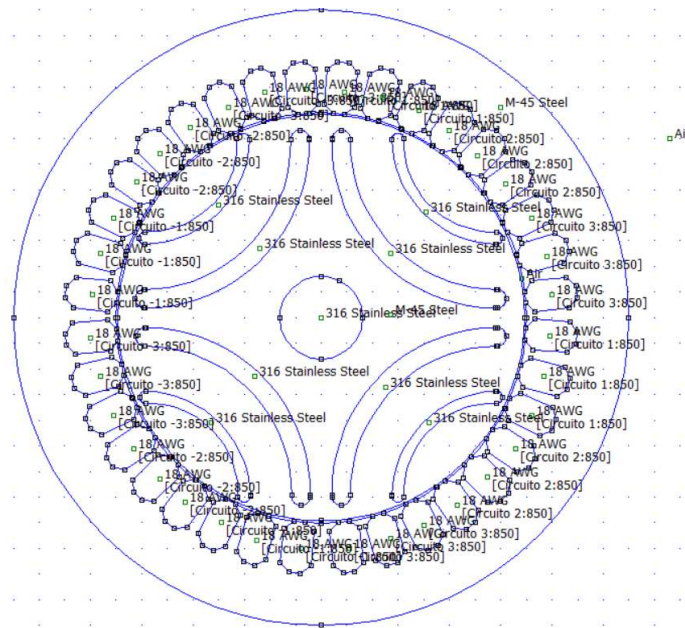


Figura 5.6 - Curvas de magnetização da topologia 1 para as diferentes posições simuladas.

A figura 5.6, foi obtida através das simulações de fluxo da figura 5.5, uma vez que os resultados foram os mesmos só que os eixos da figura são outros para verificar outro tipo de comportamento da máquina. Sendo que as curvas da figura 5.6 representam cada posição do rotor da topologia 1.

5.2 Topologia 2

Para a topologia 2 as condições de simulação *FEMM* (figura 5.7) foram as mesmas que a topologia 1, só variando a estrutura do rotor, tendo agora as barreiras de fluxo maiores dimensões, reduzindo assim o volume de material ferromagnético do caminho de fluxo do eixo direto. Foram efetuadas simulações de forma a verificar como essas alterações afetam a máquina. Esta topologia só sofreu alterações na estrutura do rotor e nenhuma no estator, sendo as condições de excitação da máquina as mesmas.



No entanto, durante o processo de simulação, verificou-se que seria interessante alterar o material do barramento para esta topologia em específico. Sendo que desta topologia existem 3 versões, a versão da figura 5.7, uma versão onde o material da barreira de fluxo é ar (figura 5.13, modelo 2A) e outra versão onde o material é feito de íman alnico (figura 5.19, modelo 2B).

A figura 5.8 demonstra uma fase da simulação da topologia 2, onde se observa uma *mesh* criada pelo *FEMM*.

O processo de simulação da característica do binário é o mesmo que o da topologia 1, assim como o processo de simulação do fluxo e do coeficiente de indução.

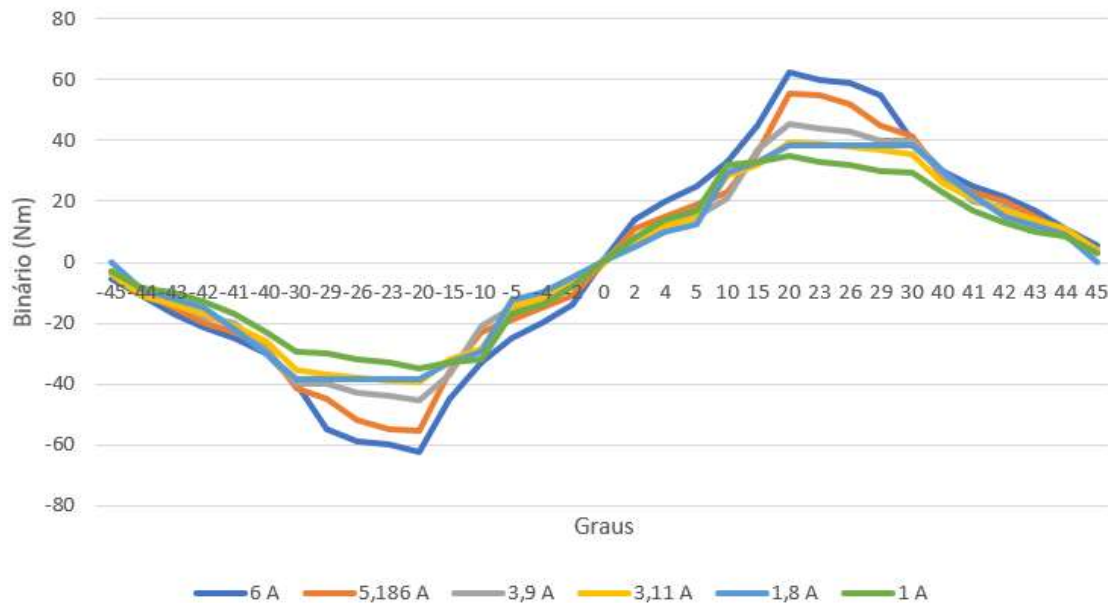


Figura 5.9 - Característica do binário da topologia 2 em função da posição do rotor.

As curvas representadas na figura 5.9, obtidas através da tabela 6.6, representam a curva de binário para cada valor de corrente referência e para cada posição do rotor da topologia 2. Como se observa na figura 5.9, os resultados a partir da posição alinhada até a posição -45, é um espelho do comportamento da curva de 0 a 45 graus, mas no sentido inverso.

Nas figuras 5.10, 5.11 e 5.12 encontra-se o resultado da simulação da característica do fluxo e indução, estando os resultados obtidos nas tabelas 6.7, 6.8 e 6.9.

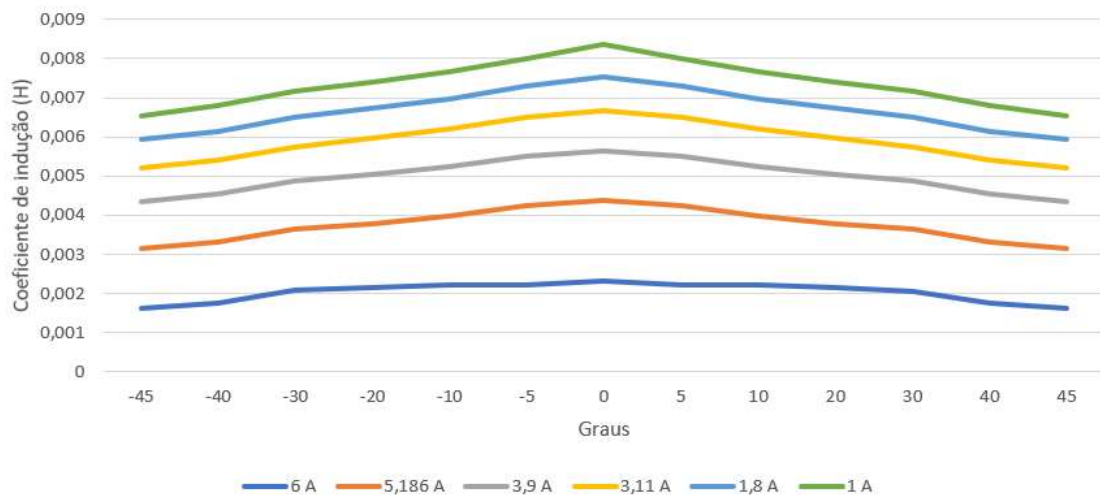


Figura 5.10 - Característica não linear do coeficiente de indução de uma fase da topologia 2 em função da posição do rotor.

A figura 5.10, representa o comportamento do coeficiente de indução da máquina ao longo das várias posições do rotor da topologia 2. Sendo que cada curva representa um valor de corrente da fase 1.

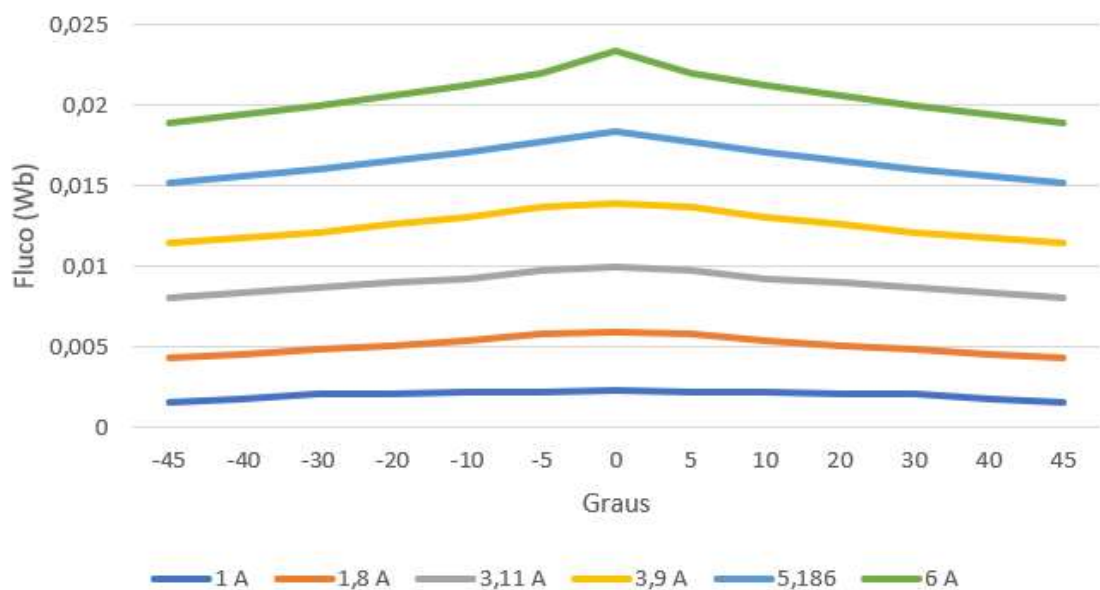


Figura 5.11 - Característica magnética do Fluxo da topologia 2 em função da posição do rotor.

A figura 5.11, é semelhante à figura 5.10, no entanto o comportamento do fluxo é inverso ao comportamento do coeficiente de indução. Cada curva representa o comportamento do fluxo para cada valor de corrente ao longo das várias posições do rotor da topologia 2.

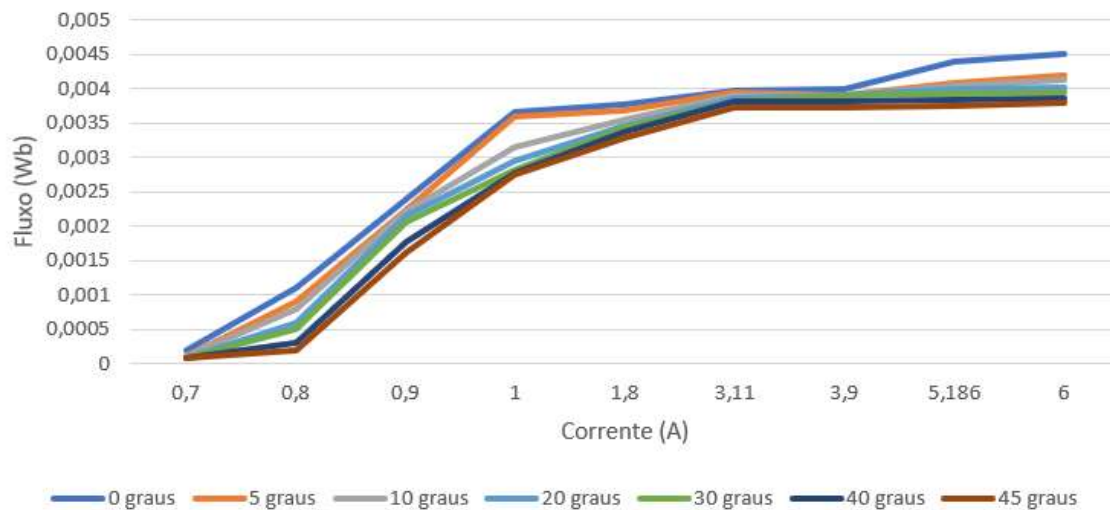


Figura 5.12 - Curvas de magnetização da topologia 2 para as posições simuladas.

A figura 5.12, foi obtida através das simulações de fluxo da figura 5.11, uma vez que os resultados foram os mesmos só que os eixos da figura são outros para verificar outro tipo de comportamento da máquina. Sendo que as curvas da figura 5.12 representam cada posição do rotor da topologia 2.

5.3 Topologia 2A

Para a topologia 2A as condições de simulação *FEMM* (figura 5.13) foram as mesmas que a da topologia 2, só variando o material das barreiras de fluxo, sendo estas agora compostas por ar em vez de aço, para verificar de que forma isso influencia as características da máquina. Esta topologia só sofreu alterações na estrutura do rotor e nenhuma no estator, sendo as condições de excitação da máquina as mesmas.

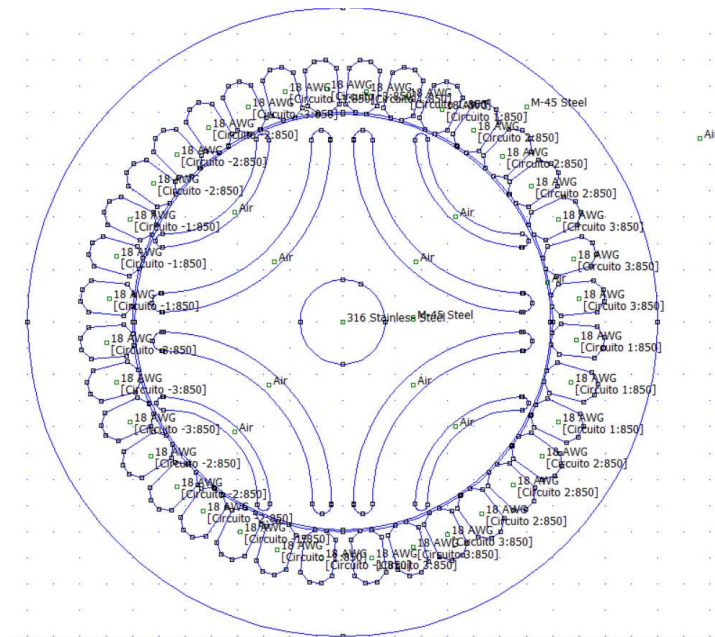


Figura 5.13 - Topologia 2A no FEMM com materiais definidos.

A figura 5.14 demonstra uma fase da simulação da topologia 2A, onde se observa uma mesh criada pelo FEMM.

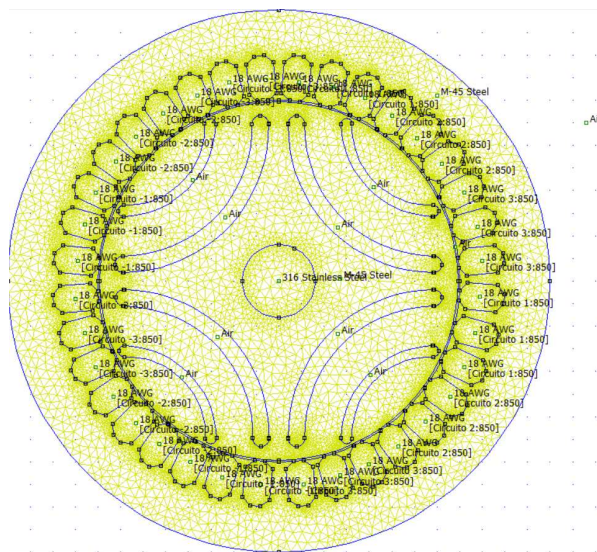


Figura 5.14 - Mesh da topologia 2A.

O processo de simulação da característica do binário é o mesmo que o da topologia 2A, assim como o processo de simulação do fluxo e do coeficiente de indução.

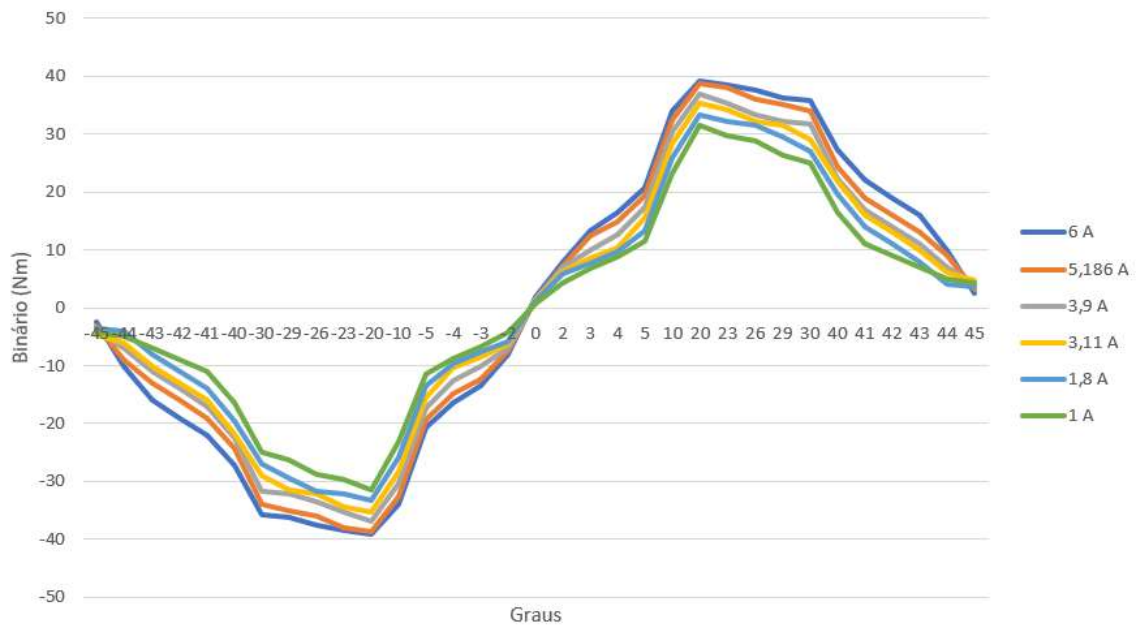


Figura 5.15 - Característica do binário da topologia 2A em função da posição do rotor.

As curvas representadas na figura 5.15, obtidas através da tabela 6.10, representam a curva de binário para cada valor de corrente referência e para cada posição do rotor da topologia 2A. Como se observa na figura 5.15, os resultados a partir da posição alinhada até a posição -45, é um espelho do comportamento da curva de 0 a 45 graus, mas no sentido inverso.

Nas figuras 5.16, 5.17 e 5.18 encontra-se o resultado da simulação da característica do fluxo e do coeficiente de indução, estando os resultados obtidos nas tabelas 6.11, 6.12 e 6.13.

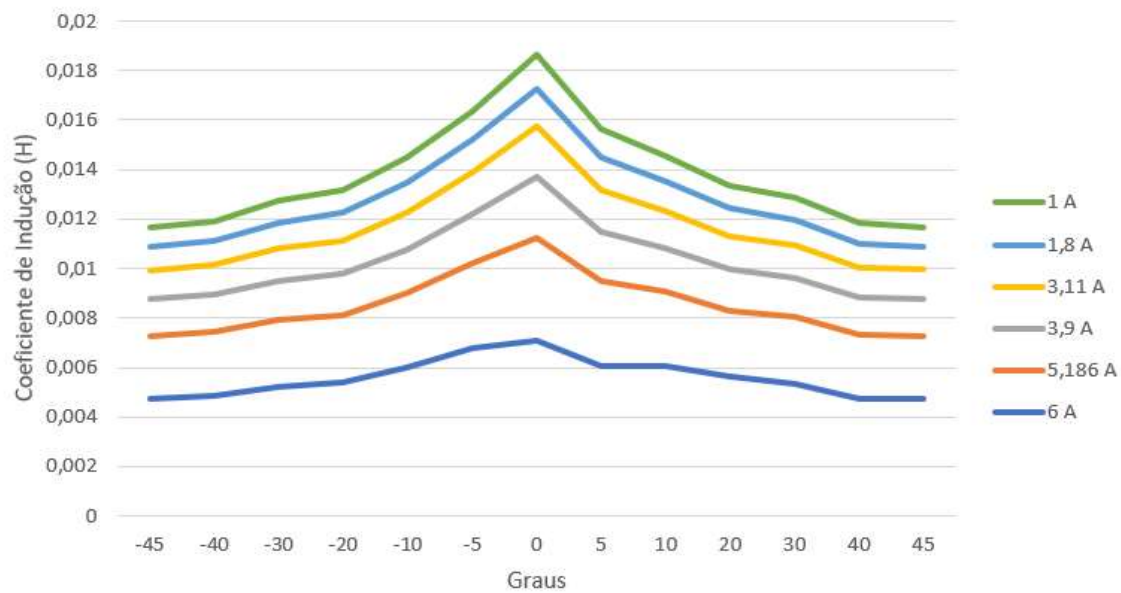


Figura 5.16 - Característica não linear do coeficiente de indução de uma fase da topologia 2A em função da posição do rotor.

A figura 5.16, representa o comportamento do coeficiente de indução da máquina ao longo de várias posições do rotor da topologia 2A. Sendo que cada curva representa um valor de corrente da fase 1.

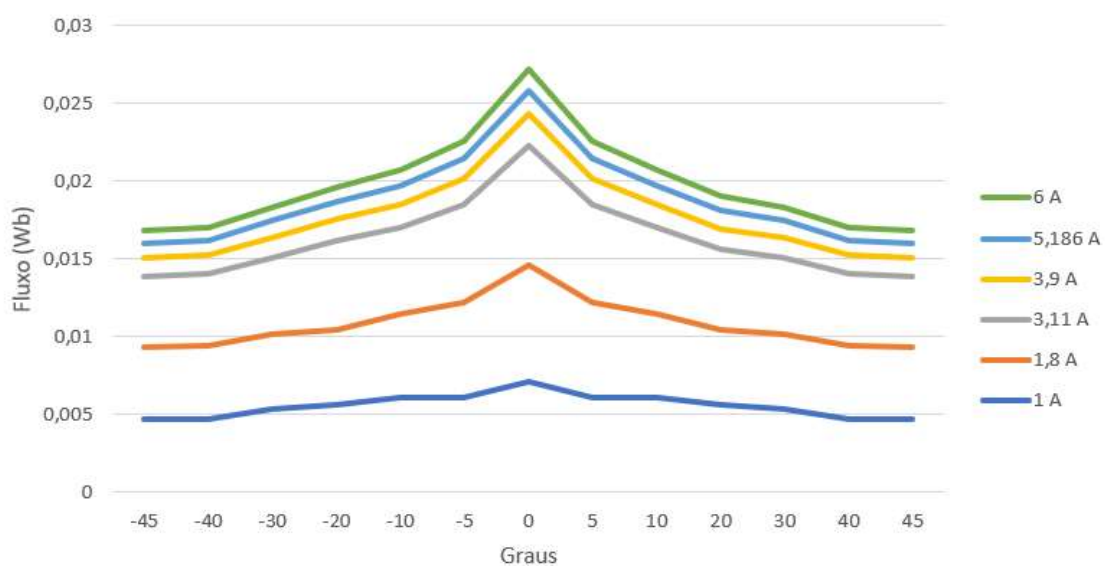


Figura 5.17 - Característica magnética do fluxo da topologia 2A em função da posição do rotor.

A figura 5.17, é semelhante à figura 5.16, no entanto o comportamento do fluxo é inverso ao comportamento do coeficiente de indução. Cada curva representa o comportamento do fluxo para cada valor de corrente ao longo das várias posições do rotor da topologia 2A.

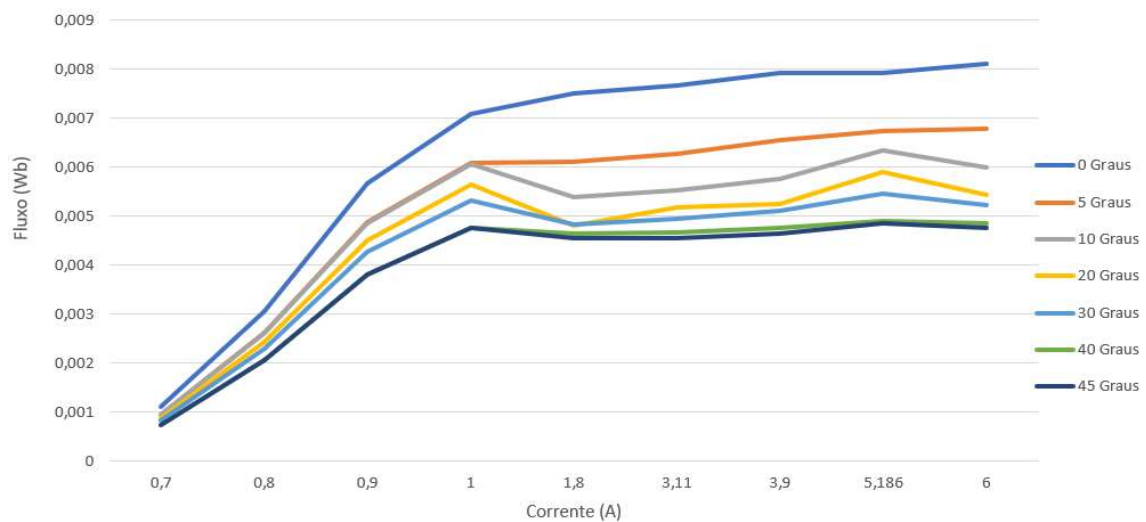


Figura 5.18 - Curvas de magnetização da topologia 2A para as posições simuladas.

A figura 5.18, foi obtida através das simulações de fluxo da figura 5.17, uma vez que os resultados foram os mesmos só que os eixos da figura são outros para análise comparativa com outras topologias. Sendo que as curvas da figura 5.18 representam cada posição do rotor da topologia 2A.

5.4 Topologia 2B

Para a topologia 2B as condições de simulação *FEMM* (figura 5.19) foram as mesmas que a da topologia 2, só variando o material das barreiras de fluxo, sendo essas agora compostas por alnico (ímã composto por ligas de ferro) em vez de aço, para verificar de que forma isso influencia as características da máquina. Esta topologia só sofreu alterações na estrutura do rotor e nenhuma no estator, sendo as condições de excitação da máquina as mesmas.

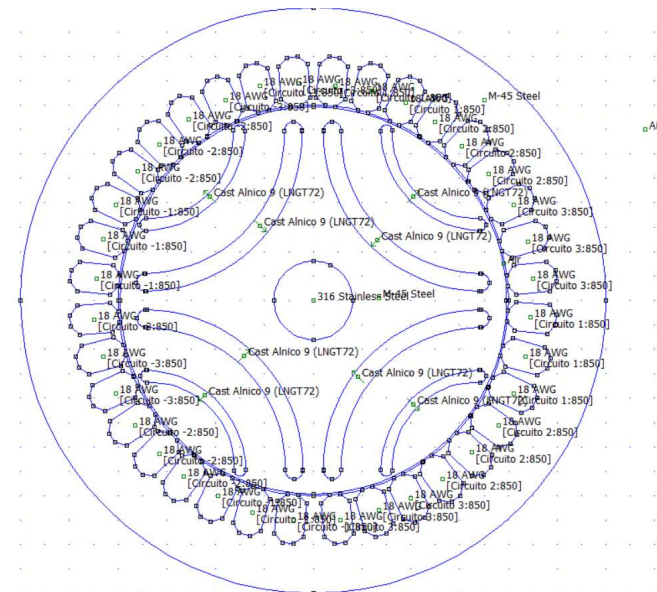


Figura 5.19 - Topologia 2B no FEMM com materiais definidos

A figura 5.20 demonstra uma fase da simulação da topologia 2, onde se observa uma mesh criada pelo FEMM.

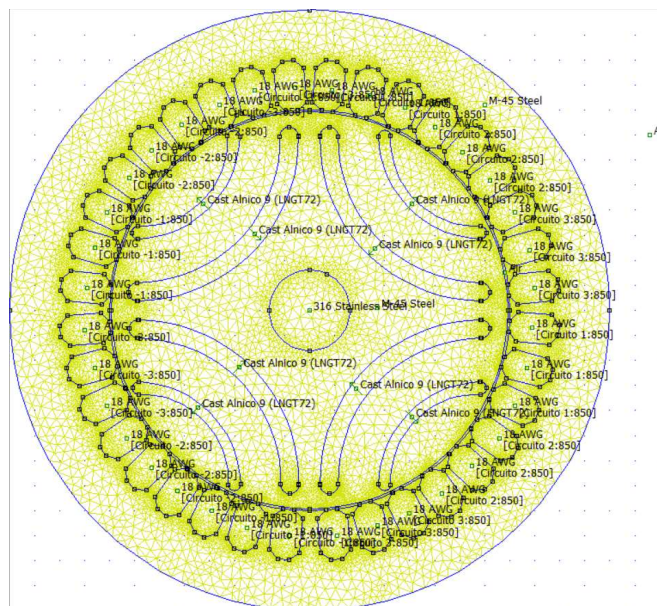


Figura 5.20 - Mesh da topologia 2B.

O processo de simulação da característica do binário é o mesmo que o da topologia 1, assim como o processo de simulação do fluxo e da indução.

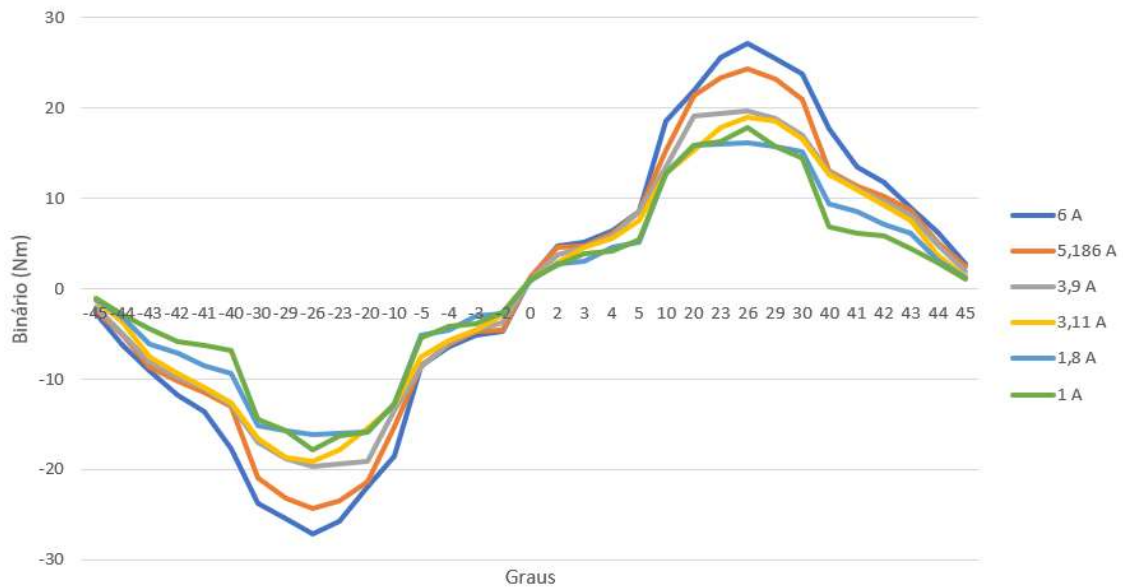


Figura 5.21 - Característica do binário da topologia 2B em função da posição.

As curvas representadas na figura 5.21, obtidas através da tabela 6.14, representam a curva de binário para cada valor de corrente referência e para cada posição do rotor da topologia 2B. Como se observa na figura 5.21, os resultados a partir da posição alinhada até a posição -45, é um espelho do comportamento da curva de 0 a 45 graus, mas no sentido inverso.

Nas figuras 5.22, 5.23 e 5.23 encontra-se o resultado da simulação da característica do fluxo e do coeficiente de indução, estando os resultados obtidos nas tabelas 6.15, 6.16 e 6.17.

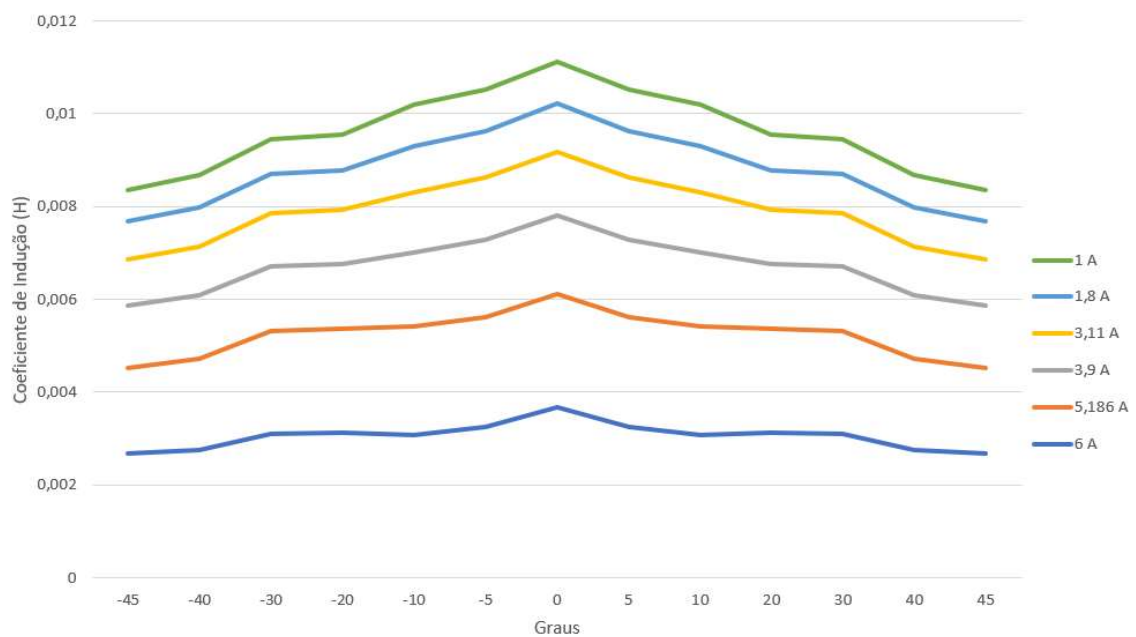


Figura 5.22 - Característica não linear do coeficiente de indução de uma fase da topologia 2B em função da posição do rotor.

A figura 5.22, representa o comportamento do coeficiente de indução da máquina ao longo das várias posições do rotor da topologia 2. Sendo que cada curva representa um valor de corrente da fase 1.

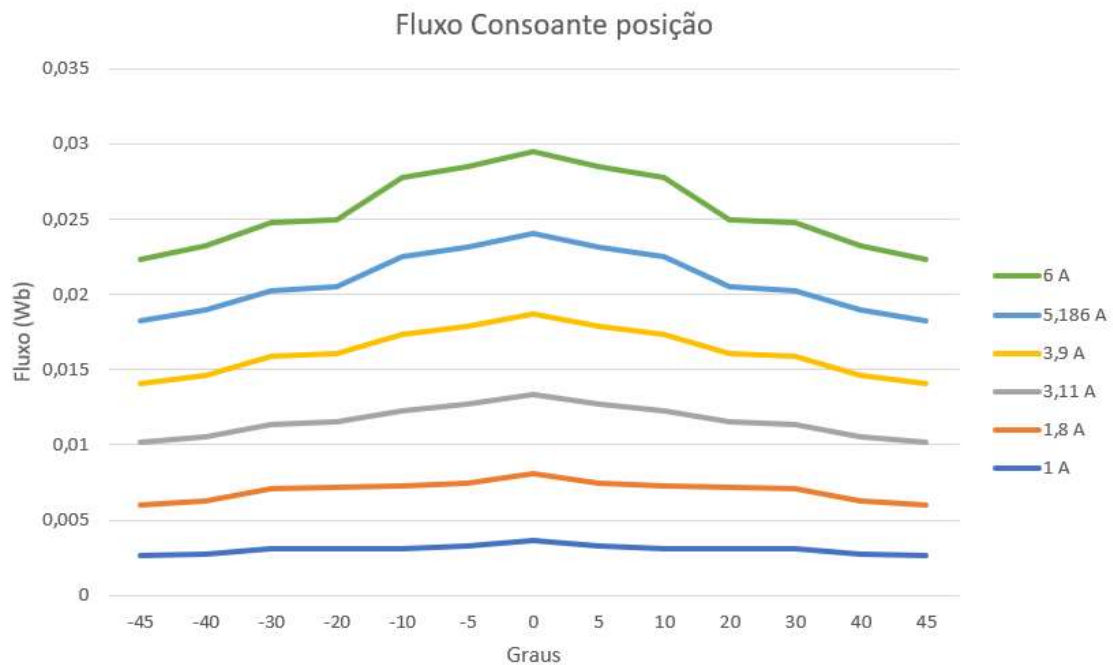


Figura 5.23 - Característica magnética do fluxo da topologia 2B em função da posição do rotor.

A figura 5.23, é semelhante à figura 5.22, no entanto o comportamento do fluxo é inverso ao comportamento do coeficiente de indução. Cada curva representa o comportamento do fluxo para cada valor de corrente ao longo das várias posições do rotor da topologia 2B.

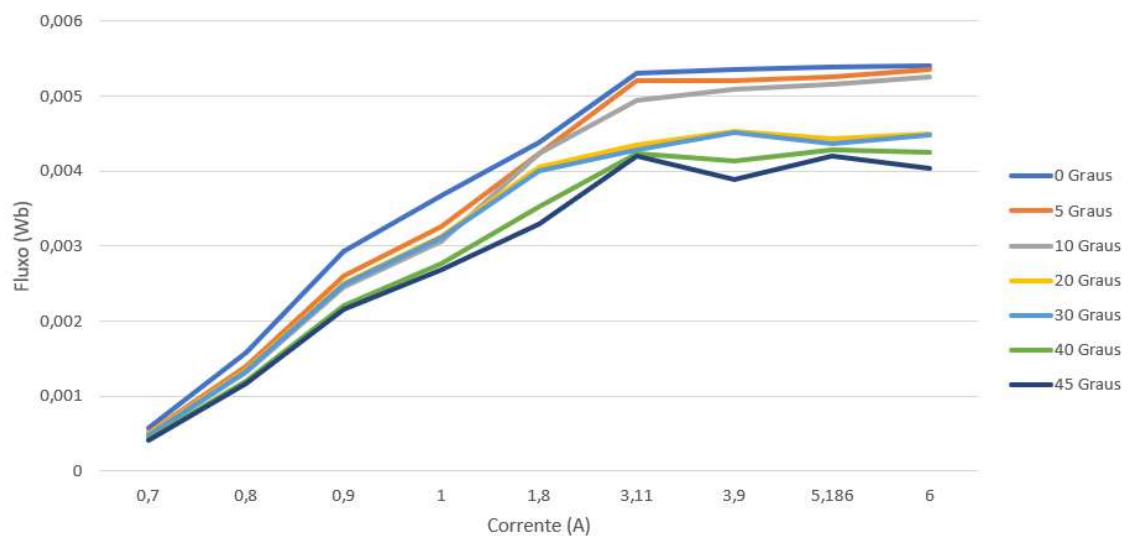


Figura 5.24 - Curvas de magnetização da topologia 2B para as posições simuladas.

A figura 5.24, foi obtida através das simulações de fluxo da figura 5.23, uma vez que os resultados foram os mesmos só que os eixos da figura são outros para verificar outro tipo de comportamento da máquina. Sendo que as curvas da figura 5.24 representam cada posição do rotor da topologia 2B.

5.5 Topologia 3

Para a topologia 3 as condições de simulação *FEMM* (figura 5.25) foram as mesmas que a da topologia 1, só variando o número de barreiras do rotor. Sendo que agora, o rotor possui mais uma barreira que na topologia 1, para verificar de que forma isso influencia as características da máquina. Este modelo só sofreu alterações na estrutura do rotor e nenhuma no estator, sendo as condições de excitação da máquina as mesmas.

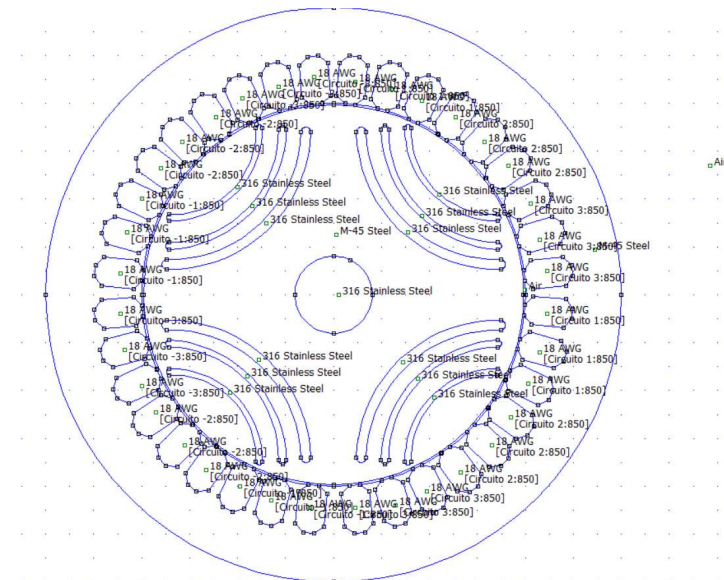


Figura 5.25 - Topologia 3 no FEMM com materiais definidos.

A figura 5.26 demonstra uma fase da simulação da topologia 3, onde se observa uma mesh criada pelo *FEMM*. Esta mesh é mais concentrada nas zonas de maior concentração de materiais, de forma a conseguir efetuar todas as simulações de forma mais exata. A mesh pode ser configurada para efetuar mais cálculos ou menos cálculos, sendo que isso influencia o tempo de simulação do programa.

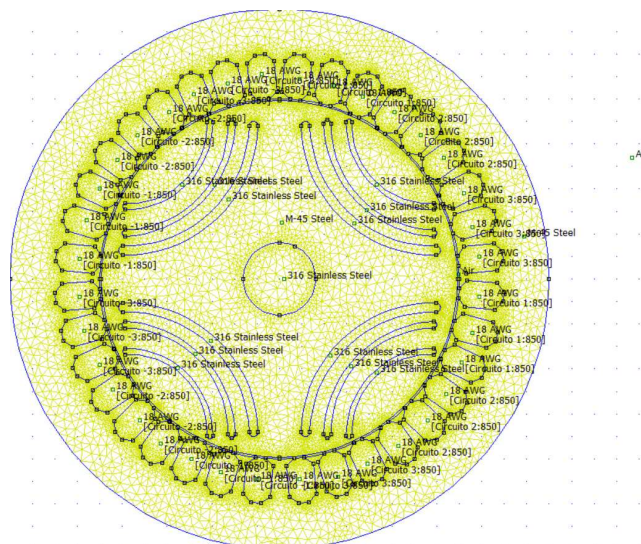


Figura 5.26 - Mesh da topologia 3.

O processo de simulação da característica do binário é o mesmo que o da topologia 1, assim como o processo de simulação do fluxo e da indução.

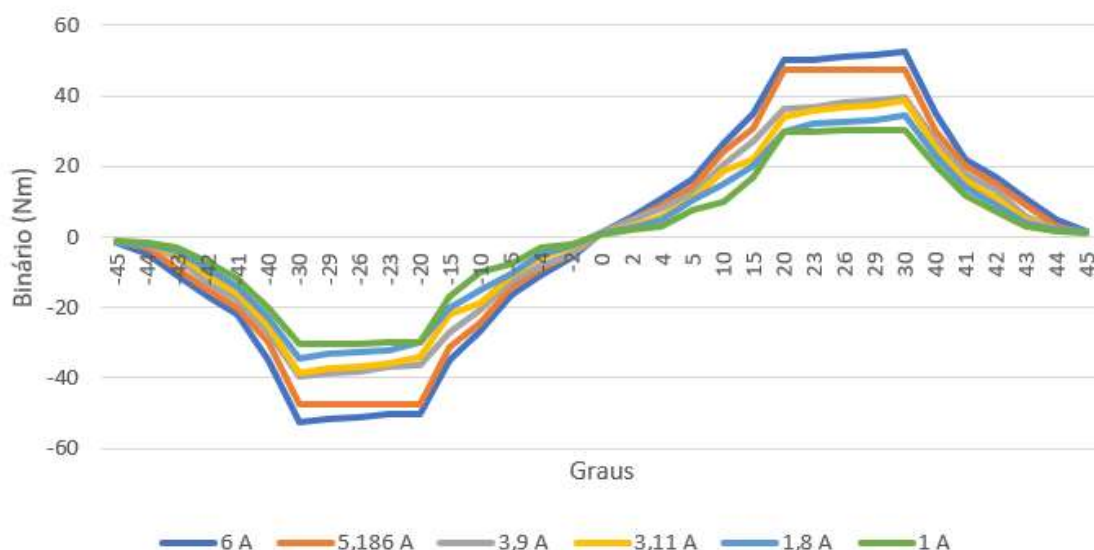


Figura 5.27 - Característica do binário da topologia 3 em função da posição do rotor.

As curvas representadas na figura 5.27, obtidas através da tabela 6.18, representam a curva de binário para cada valor de corrente referência e para cada posição do rotor da topologia 3. Como se observa na figura 5.27, os resultados a partir da posição alinhada até a posição -45, é um espelho do comportamento da curva de 0 a 45 graus, mas no sentido inverso.

Nas figuras 5.28, 5.29 e 5.30 encontra-se o resultado da simulação da característica do fluxo e do coeficiente de indução, estando os resultados obtidos nas tabelas 6.19, 6.20 e 6.21.

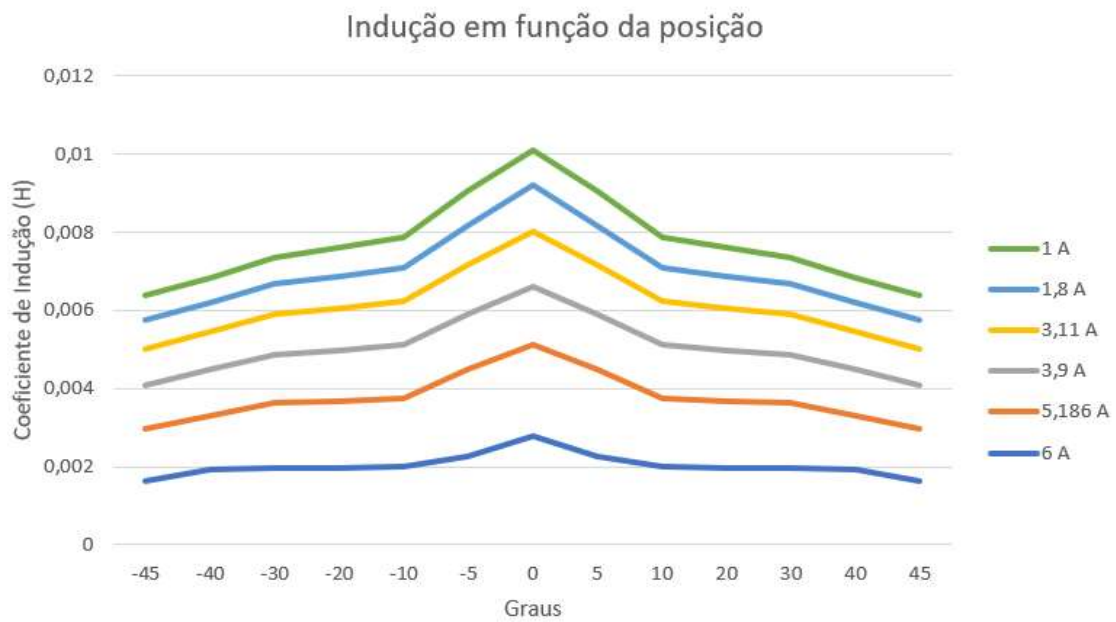


Figura 5.28 - Característica não linear do coeficiente de indução de uma fase da topologia 3 em função da posição do rotor.

A figura 5.28, representa o comportamento do coeficiente de indução da máquina ao longo de várias posições do rotor da topologia 3. Sendo que cada curva representa um valor de corrente da fase 1.

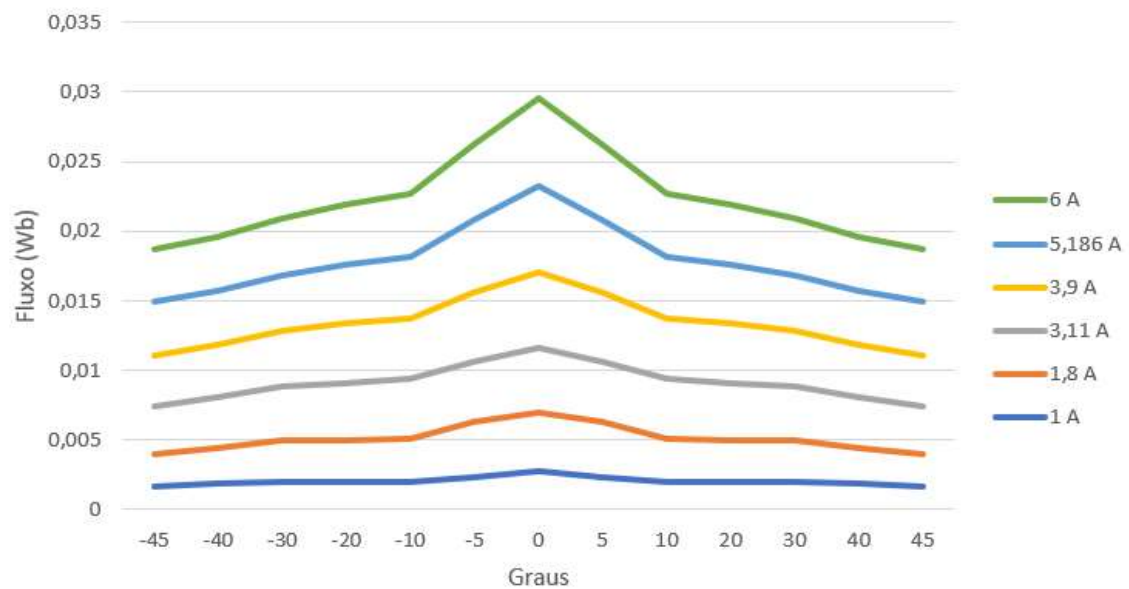


Figura 5.29 - Característica magnética do fluxo da topologia 3 em função da posição do rotor.

A figura 5.29, é semelhante à figura 5.28, no entanto o comportamento do fluxo é inverso ao comportamento do coeficiente de indução. Cada curva representa o comportamento do fluxo para cada valor de corrente ao longo das várias posições do rotor da topologia 3.

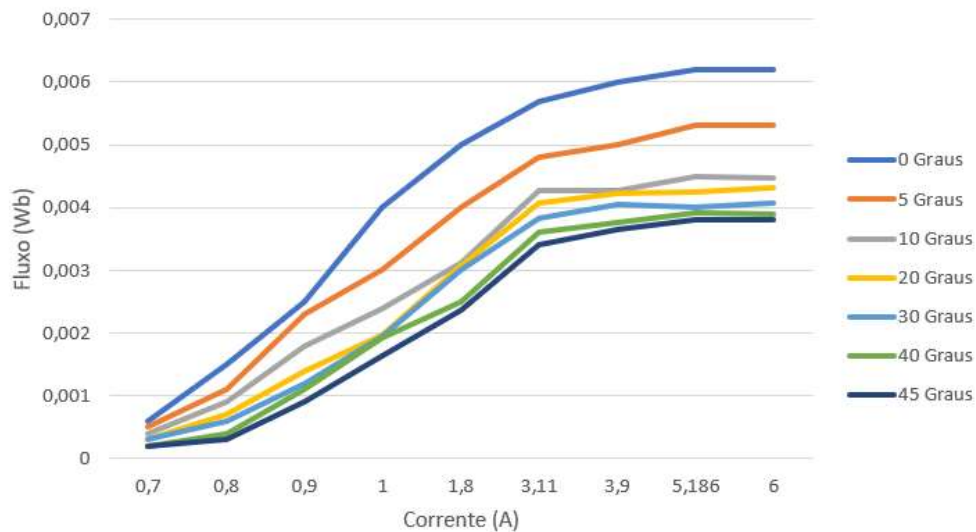


Figura 5.30 - Curvas de magnetização da topologia 3 para as posições simuladas.

A figura 5.30, foi obtida através das simulações de fluxo da figura 5.29, uma vez que os resultados foram os mesmos só que os eixos da figura são outros para verificar outro tipo de comportamento da máquina. Sendo que as curvas da figura 5.30 representam cada posição do rotor da topologia 3.

Capítulo 6

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações e uma análise comparativa entre eles.

6 Discussão de resultados

6.1 Resultados do Topologia 1

Após realizadas as simulações para a topologia 1, foi possível observar o comportamento da máquina. Sendo que a tabela 6.1 representa os valores de binário que foram retirados da simulação e usados para formar a figura 5.3.

Tabela 6.1 - Resultados do binário para a topologia 1.

Graus (°)	Binário (Nm)					
	Corrente					
	6 A	5,186 A	3,9 A	3,11 A	1,8 A	1 A
0	1,6	1,34	0,7	0,5	0,634	0,2088
2	7,89	8,6	6,88	5	5,48	3,56
3	10	11	11	8	7	5
4	11	14,6	14	12	9	7
5	14	15,2	16,68	17,3	13	11
10	19,24	17,92	18,36	21,04	18	14,76
20	30,64	32,248	27,32	29,12	26	23,84
30	47,52	45,12	37,32	31,6	31	34,24
33	48	46	38	32	31,5	34,9
36	45	43	36	31	31	34
39	42	40	32	27	25	29
40	40	38	30	23	22	25
41	35	33	25	18	17	20
42	28	22,48	20	16	13	17
43	19	15	13	11	9	10,97
44	10	9	4,16	6,64	7,84	4,33
45	1,76	1,96	1,12	1,74	1,53	1,9

Segundo a tabela 6.1, os valores de binário da topologia 1 atingem o valor máximo por volta dos 30° de posicionamento e mantém-se nesses valores altos até aos 40°. Estes valores depois decrescem rapidamente para valores quase nulos o que indica que o posicionamento do rotor, para esta topologia, deve estar entre os 30° e os 40° para se obter um valor máximo de binário.

Todas as curvas da figura 5.3 seguem o mesmo comportamento e, segundo os resultados obtidos, quanto mais se aumenta a corrente, maior será o binário máximo, comprovando assim a expressão 3.3.

Na teoria, os valores de binário seriam máximos quando a posição de rotor estivesse em quadratura com a do estator. No entanto, segundo os resultados obtidos, esse fenómeno só será totalmente verdade se a forma das barreiras do fluxo assim o permitir. De facto, a forma da geometria do motor influencia de forma bastante ativa o comportamento da máquina, nomeadamente, a zona de binário máximo.

Na figura 5.5, as curvas de fluxo possuem o comportamento que era expectável. Estas curvas foram separadas no gráfico para melhor se perceber o comportamento do fluxo, isto quer dizer que a escala apresentada na figura 6.4 não é a escala real.

Nas tabelas 6.2 e 6.3 estão os resultados da simulação do fluxo e, como se pode constatar, comprovam o que foi dito no capítulo 3. Onde diz que o fluxo é máximo quando o rotor está alinhado com o estator e os resultados confirmam essa afirmação.

Tabela 6.2 - Resultados do fluxo para a topologia 1 parte 1.

Graus (°)	Fluxo (Wb)		
	Corrente		
	0,7 A	0,8 A	0,9 A
0	0,0005	0,0024	0,0045
2	0,00046	0,0022	0,0044
4	0,00043	0,002	0,0043
5	0,0004	0,0018	0,00423
10	0,0003	0,0016	0,003642
20	0,0002	0,0014	0,0033
30	0,0001	0,0012	0,0028
45	0,00009	0,001	0,0019

Tabela 6.3 - Resultados do fluxo para a topologia parte 2.

Graus (°)	Fluxo (Wb)					
	Corrente					
	1 A	1,8 A	3,11 A	3,9 A	5,186 A	6 A
0	0,0053	0,00539	0,00564	0,00575	0,005979	0,006
2	0,0051	0,0052	0,0053	0,0054	0,0056	0,0055
4	0,00475	0,0051	0,0051	0,0051	0,0052	0,0051
5	0,00464	0,00497	0,005	0,005042	0,005077	0,00501
10	0,0044	0,0048	0,004845	0,00479	0,00473	0,004747
20	0,004	0,0046	0,004676	0,00475	0,00463	0,0045
30	0,0037	0,0042	0,0044	0,00448	0,00442	0,004396
45	0,003	0,0038	0,0043	0,00442	0,004369	0,004278

Segundo as tabelas 6.2, 6.3 e pela figura 5.5, à medida que a corrente aumenta, o fluxo aumentará também, mas não de forma proporcional, o que faz sentido visto que é o que está representado na expressão 3.15. De notar também que os valores de fluxo serão mais pequenos quando se aproximam da zona de quadratura. Isto deve-se à dificuldade que o fluxo tem de circular pelo rotor com os barramentos a impedir a sua passagem.

A partir da expressão 3.15, foi possível obter os resultados da tabela 6.4 e consequentemente dos resultados da figura 5.4. O comportamento do coeficiente de indução é inverso ao do fluxo visto que o coeficiente de indução é inversamente proporcional à corrente.

Tabela 6.4 - Resultados do coeficiente de indução para a topologia 1.

Graus (°)	Coeficiente de Indução (H)					
	Corrente					
	1 A	1,8 A	3,11 A	3,9 A	5,186 A	6 A
0	0,00501	0,002994	0,001695	0,001474	0,001153	0,001
2	0,00463	0,00286	0,00167	0,0014	0,0013	0,00093
4	0,00444	0,0028	0,00164	0,00134	0,0011	0,00088
5	0,00423	0,00276	0,00162	0,00129	0,000979	0,00084
10	0,003642	0,002528	0,001558	0,001228	0,000912	0,000791
20	0,002439	0,002056	0,001504	0,001218	0,000893	0,00075
30	0,002392	0,001972	0,001457	0,001149	0,000852	0,000733
45	0,001538	0,001822	0,001383	0,001133	0,000842	0,000713

A tabela 6.4, apresenta os valores do coeficiente de indução e, contrariamente aos resultados das tabelas 6.2 e 6.3, o valor do coeficiente de indução irá diminuir consoante o aumento de corrente. Este facto é explicado pela expressão 3.16.

Outra forma de ver o comportamento da máquina, é através da figura 5.6, onde se observa a saturação magnética do motor. A tabela 6.5 mostra os resultados obtidos para a figura 5.6. Pela observação da tabela, pode-se confirmar as afirmações prévias do fluxo. Ou seja, o fluxo aumenta consoante a corrente, mas diminui consoante se afasta da posição alinhada. É possível observar que a máquina entra em saturação por volta dos 3,11 A.

Tabela 6.5 - Resultados do fluxo para a topologia 1 em função da corrente.

Corrente	Fluxo (Wb)					
	Graus					
	0°	5°	10°	20°	30°	45°
0,7 A	0,0005	0,0004	0,0003	0,0002	0,0001	0,00009
0,8 A	0,0024	0,0018	0,0016	0,0014	0,0012	0,001
0,9 A	0,0045	0,00423	0,003642	0,0033	0,0028	0,0019
1 A	0,0053	0,00464	0,0044	0,004	0,0037	0,003
1,8 A	0,00539	0,00497	0,0048	0,0046	0,0042	0,0038
3,11 A	0,00564	0,005	0,004845	0,004676	0,0044	0,0043
3,9 A	0,00575	0,005042	0,00479	0,00475	0,00448	0,00442
5,186 A	0,005979	0,005077	0,00473	0,00463	0,00442	0,004369
6 A	0,006	0,00501	0,004747	0,0045	0,004396	0,004278

Para melhor entender os resultados obtidos nas tabelas 6.2 e 6.3, a figura 6.1 fornece algum esclarecimento. Já foi estabelecido que os resultados das tabelas 6.2 e 6.3 indicam que o fluxo diminui à medida que se afasta da posição alinhada, mas para se perceber a causa do comportamento do fluxo, é necessário observar as figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4.

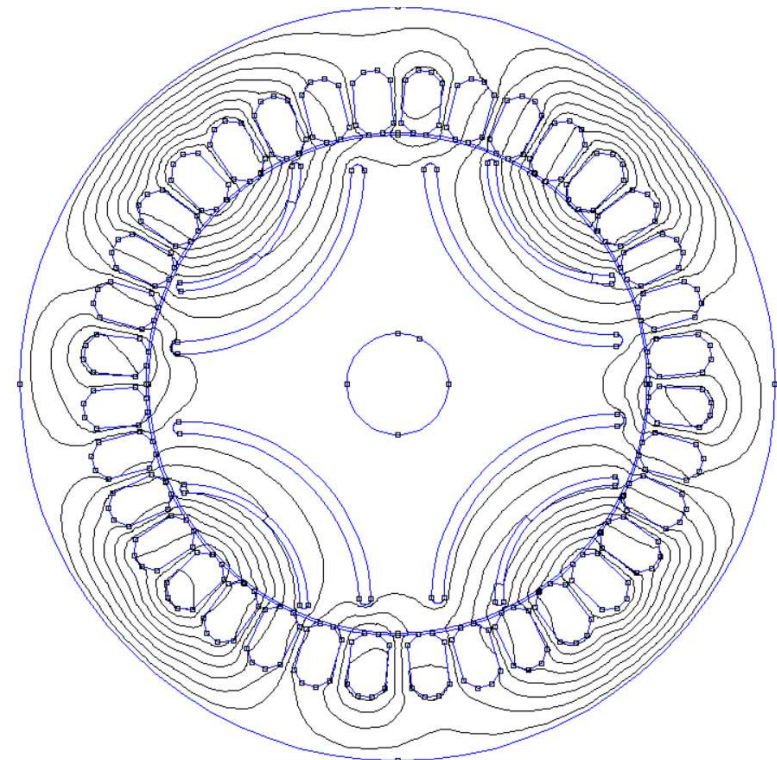


Figura 6.1 - Resultado da simulação da topologia 1 na posição alinhada.

Na figura 6.1, observa-se que o fluxo circula maioritariamente pela barreira mais exterior da máquina, sendo que o fluxo tentará procurar sempre o caminho de menor resistência. Nesta

figura, todos os caminhos de fluxo são relativamente curtos e, conseqüentemente, o valor do fluxo será máximo nesta posição, justificando então os resultados das tabelas 6.2 e 6.3. A figura 6.2 serve como complemento da figura 6.1, uma vez que demonstra onde o fluxo se concentra mais.

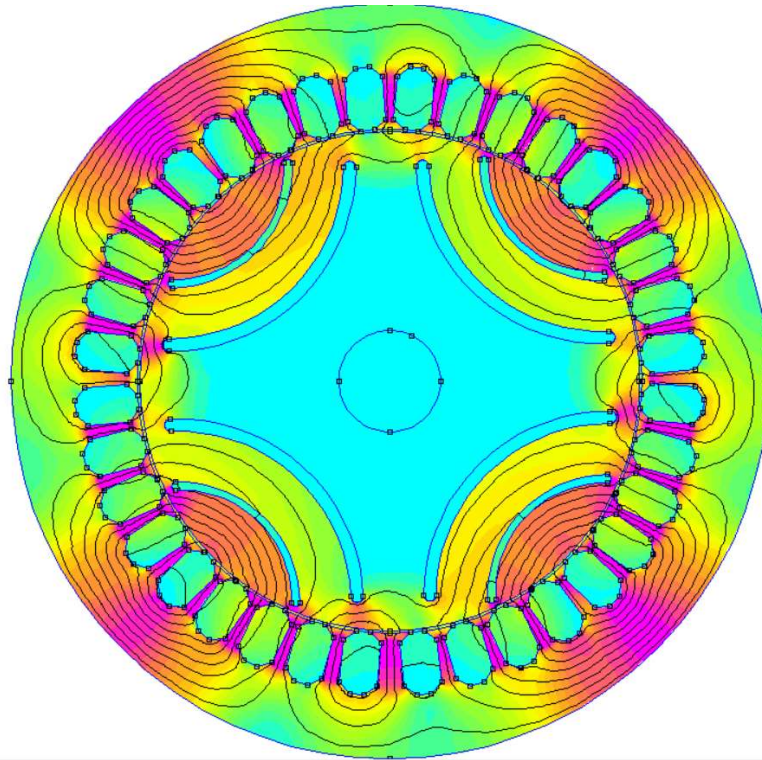


Figura 6.2 - Resultado da simulação da topologia 1 na posição alinhada com foco na concentração de fluxo.

As figuras 6.3 e 6.4, representam o rotor numa posição desalinhada, mais especificamente, nos 20°. Na figura 6.3, o fluxo já possui mais dificuldade em circular no rotor e apresenta caminhos mais longos de fluxo, podendo até em alguns momentos transpor a barreira de fluxo para facilitar o caminho.

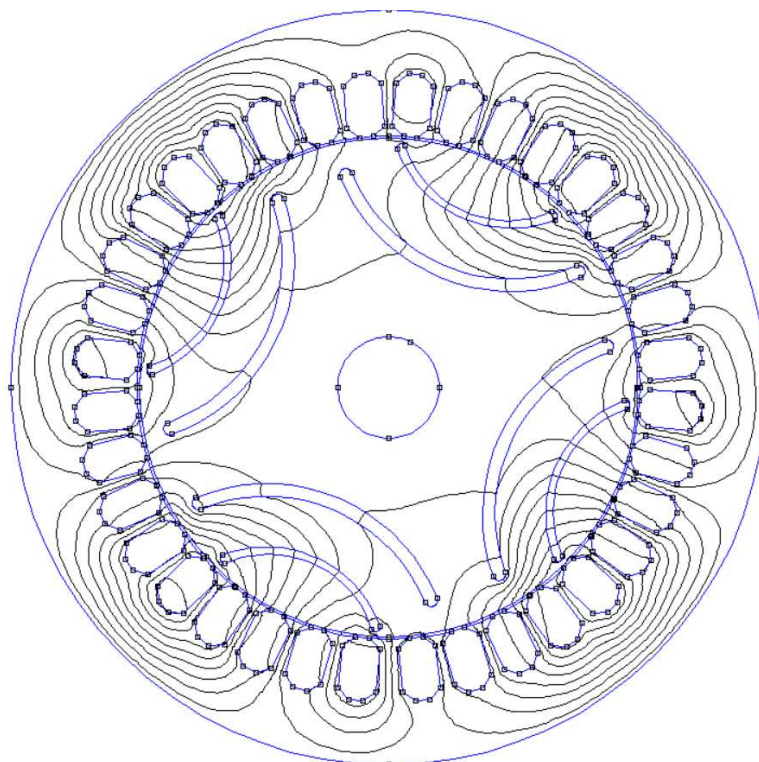


Figura 6.3 - Resultado da simulação da topologia 1 na posição desalinhada.

Na figura 6.4, observa-se que já não existe um foco de fluxo como havia na figura 6.2. Então, a junção de longos caminhos de fluxo e menor concentração de fluxo, dá origem a menores valores de fluxo como as tabelas 6.2 e 6.3 mostram.

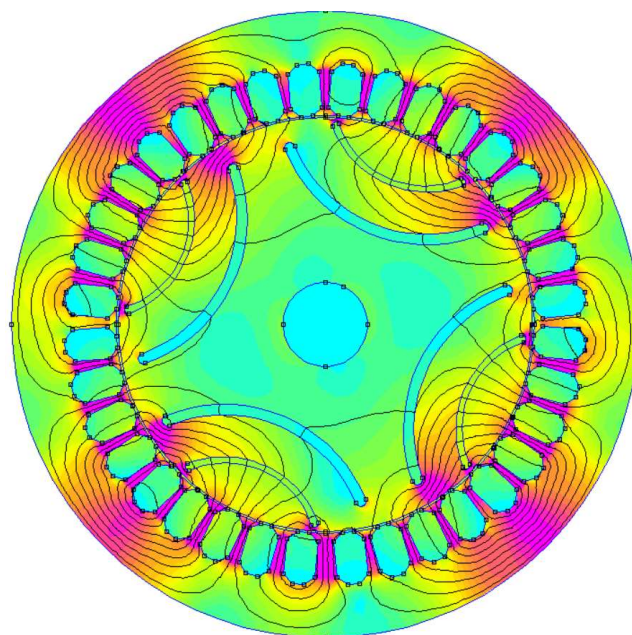


Figura 6.4 - Resultado da simulação da topologia 1 na posição desalinhada com foco na concentração de fluxo.

Na figura 6.5 verifica-se que a zona em quadratura teórica não oferece mais resistência à passagem de fluxo, uma vez que o fluxo circula com mais facilidade. Complementando assim os resultados da tabela 6.1, que indica que o binário, quando está na posição de 45 graus, é mínimo.

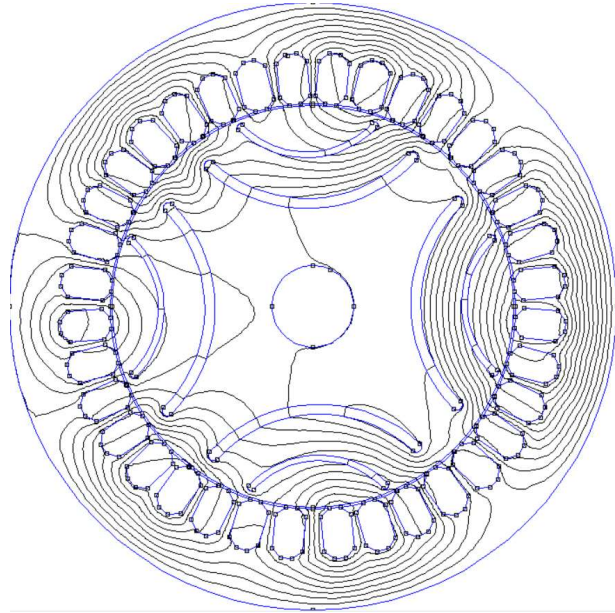


Figura 6.5 – Resultado da simulação da topologia 1 na posição de 45 graus.

A figura 6.6 mostra como o aumento de corrente, aumenta também o fluxo, demonstrado pelo maior número de linhas de fluxo. Comparando as figuras 6.6 e 6.1, pode-se verificar que o comportamento do fluxo é o mesmo, alterando-se apenas a quantidade de fluxo presente na máquina.

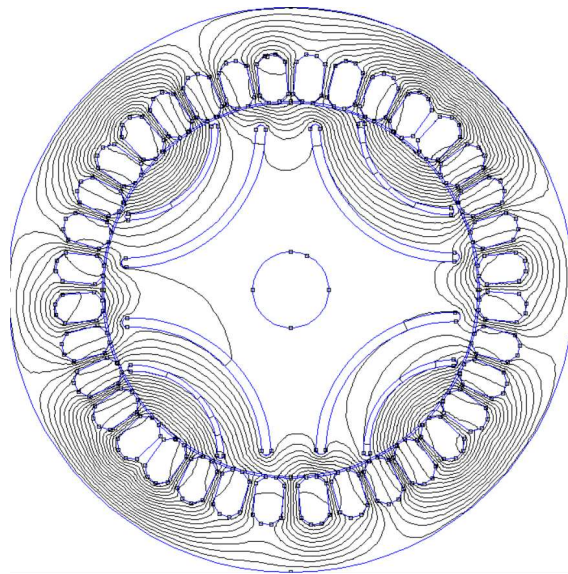


Figura 6.6 - Resultados da simulação da topologia 1 com valor de corrente superior à figura 6.1.

6.2 Resultados da Topologia 2

Após realizadas as simulações para a topologia 2, foi possível observar o comportamento da máquina. Sendo que a tabela 6.6 representa os valores de binário que foram retirados da simulação e usados para formar a figura 5.9.

Tabela 6.6 - Resultados do binário para a topologia 2.

Graus (°)	Binário (Nm)					
	Corrente					
	6 A	5,186 A	3,9 A	3,11 A	1,8 A	1 A
0	0,92	0,196	0,96	0,064	0,6	0,7
2	14	11	8	7	5	8
4	20	15	13	12	10	14
5	25	19	15	14,64	12,48	17
10	33,2	23,2	21,08	28,52	29,44	32
15	45	36	37	32	33	33
20	62,64	55,32	45,44	39,34	38,68	34,8
23	60	55	44	39	38,6	33
26	59	52	43	38	38,4	32
29	55	45	40	37	38,3	30
30	40	41,64	39,8	35,6	38,24	29,68
40	30,08	28,12	29	26	30	23
41	25	23	20	21	22	17
42	21,56	20	18	17	15	13
43	17	15	13	14	12	10
44	11	9	8,56	11,188	9,2	8,312
45	5,4	3	3,32	4	0,24	3

Segundo a tabela 6.6, os valores de binário da topologia 2, ao contrário da topologia 1, atingem o valor máximo por volta dos 20° de posicionamento e mantém-se nesses valores altos até aos 30°. Estes valores depois decrescem rapidamente para valores quase nulos o que indica que o posicionamento do rotor, para esta topologia, deve estar entre os 20° e os 30° para se obter um valor máximo de binário.

Comparativamente à topologia 1, a topologia 2 possui valores de binário superiores o que pode indicar que o aumento da grossura das barreiras de fluxo tem influencia no binário da máquina, fornecendo mais binário que a topologia inicial (topologia 1).

Todas as curvas da figura 5.9 seguem o mesmo comportamento e, segundo os resultados obtidos, quanto mais se aumenta a corrente, maior será o binário máximo, como se pode observar na tabela 6.6 e na figura 5.7.

Na figura 5.11, as curvas de fluxo possuem o comportamento que era expectável. Estas curvas foram separadas no gráfico para melhor se perceber o comportamento do fluxo, isto quer dizer que a escala apresentada na figura 5.11 não é a escala real.

Na tabela 6.7 estão os resultados da simulação do fluxo e, como se pode constatar, comprovam o que foi dito no capítulo 3. Onde diz que o fluxo é máximo quando o rotor está alinhado com o estator e os resultados confirmam essa afirmação.

Tabela 6.7 - Resultados do fluxo para a topologia 2.

Graus (°)	Fluxo (Wb)					
	Corrente					
	1 A	1,8 A	3,11 A	3,9 A	5,186 A	6 A
0	0,002332	0,003656	0,00398	0,004	0,0044	0,00504
5	0,002236	0,003596	0,003955	0,003916	0,00408	0,0042
10	0,002228	0,003144	0,003906	0,003784	0,00404	0,004136
20	0,002147	0,00296	0,00387	0,00364	0,003996	0,004016
30	0,002071	0,002812	0,00382	0,003436	0,00394	0,003946
40	0,00177	0,002764	0,003808	0,003435	0,00384	0,00386
45	0,001608	0,002748	0,003732	0,00343	0,003724	0,003667

Comparativamente aos resultados da topologia 1, os valores da topologia 2 são inferiores. O que é justificado pelo alto binário da máquina, uma vez que o binário só existe quando existe dificuldade de circulação de fluxo e como a segunda topologia dificulta mais a circulação do fluxo do que o primeiro modelo, o fluxo será sempre inferior ao do fluxo da topologia 1.

A partir da expressão 3.15, foi possível obter os resultados da tabela 6.8 e consequentemente os resultados da figura 5.10. O comportamento do coeficiente de indução é inverso ao do fluxo visto que o coeficiente de indução é inversamente proporcional à corrente.

Tabela 6.8 - Resultados do coeficiente de indução para a topologia 2.

Graus (°)	Coeficiente de Indução (H)					
	Corrente					
	1 A	1,8 A	3,11 A	3,9 A	5,186 A	6 A
0	0,002332	0,002031	0,00128	0,001026	0,000848	0,00084
5	0,002236	0,001998	0,001272	0,001004	0,000787	0,0007
10	0,002228	0,001747	0,001256	0,00097	0,000779	0,000689
20	0,002147	0,001644	0,001245	0,000933	0,000771	0,000669
30	0,002071	0,001562	0,001228	0,000881	0,00076	0,000658
40	0,00177	0,001536	0,001224	0,000881	0,000741	0,000643
45	0,001608	0,001526	0,0012	0,00088	0,000718	0,000611

Comparando a figura 5.10 com a figura 5.4, pode-se constatar que o comportamento do coeficiente de indução é o mesmo para as duas topologias. No entanto, os valores do coeficiente de indução da topologia 2 são inferiores aos da topologia 1 como mostram as tabelas 6.8 e 6.4, respetivamente.

A tabela 6.9 possui os resultados que foram usados para a figura 5.12, que demonstra o comportamento do fluxo à medida que se afasta da posição alinhada e se aproxima da posição desalinhada. Sendo que na figura 5.12 é possível observar a zona onde a máquina entra em saturação, a mesma zona é por volta dos 3,11 A.

Tabela 6.9 - Resultados do fluxo para a topologia 2 em função da corrente.

Corrente	Fluxo (Wb)						
	Graus						
	0°	5°	10°	20°	30°	40°	45°
0,7 A	0,0002	0,0001	0,0001	0,00009	0,00009	0,00008	0,00008
0,8 A	0,0011	0,0009	0,0008	0,0006	0,0005	0,0003	0,0002
0,9 A	0,0024	0,002236	0,002228	0,002147	0,002071	0,00177	0,001608
1 A	0,003656	0,003596	0,003144	0,00296	0,002812	0,002764	0,002748
1,8 A	0,00378	0,00368	0,00356	0,003473	0,00344	0,00338	0,00329
3,11 A	0,00398	0,003955	0,003906	0,00387	0,00382	0,003808	0,003732
3,9 A	0,004	0,003916	0,003914	0,003907	0,0039	0,00382	0,00374
5,186 A	0,0044	0,00408	0,00404	0,003996	0,00394	0,00384	0,00376
6 A	0,0045	0,0042	0,004136	0,004016	0,003946	0,00386	0,0038

Comparando as figuras 5.12 e 5.6, pode-se observar que as curvas da figura 5.12 são muito mais próximas umas das outras que as da figura 5.6, o que pode indicar que a grossura dos barramentos de fluxos também influencia a saturação da máquina, condicionando os valores do fluxo de forma a não serem tão reduzidos com o afastamento da posição alinhada.

Para melhor entender os resultados obtidos na tabela 6.7, a figura 6.7 fornece algum esclarecimento. Já foi estabelecido que os resultados da tabela 6.7 indicam que o fluxo diminui à medida que se afasta da posição alinhada, mas para se perceber a causa do comportamento do fluxo, é necessário observar as figuras 6.7, 6.8, 6.9 e 6.10.

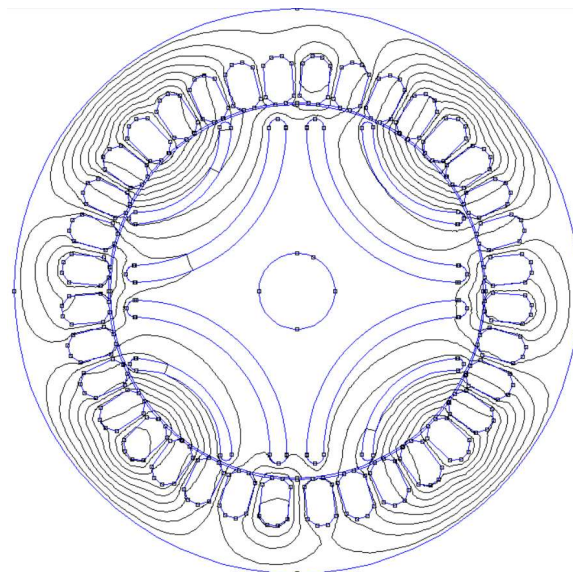


Figura 6.7 - Resultado da simulação da topologia 2 na posição alinhada.

Observando a figura 6.7, pode-se verificar que os caminhos que o fluxo toma são muito semelhantes aos da figura 6.1, sendo esses caminhos o mais curtos possível. Assim como na figura 6.1, o fluxo circula maioritariamente pela barreira exterior. Estes fatores levam a que o fluxo seja maior porque há mais concentração de fluxo e esse fluxo segue por caminhos curtos, mais uma vez justificando os resultados da tabela 6.7. A figura 6.8 serve como complemento da figura 6.7, uma vez que demonstra onde o fluxo se concentra mais e, comparativamente à figura 6.2, é bastante similar.

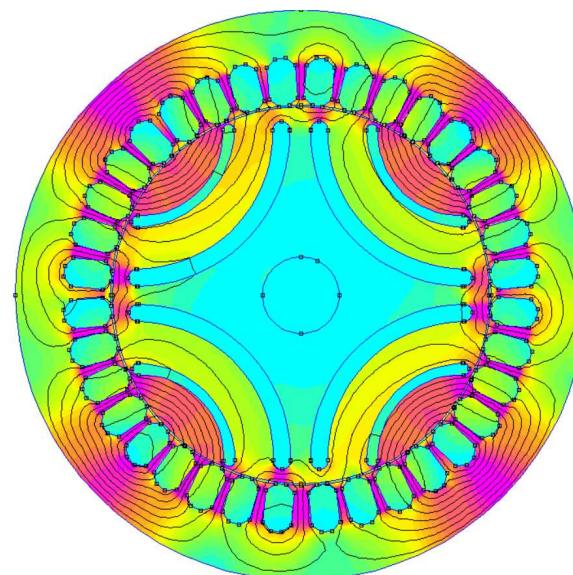


Figura 6.8 - Resultado da simulação da topologia 2 na posição alinhada com foco na concentração de fluxo.

As figuras 6.7 e 6.8, representam o rotor numa posição desalinhada, mais especificamente, nos 20°. Na figura 6.7, o fluxo já possui mais dificuldade em circular no rotor e apresenta caminhos

mais longos de fluxo, podendo até, em alguns momentos, trespassar a barreira de fluxo para facilitar o caminho.

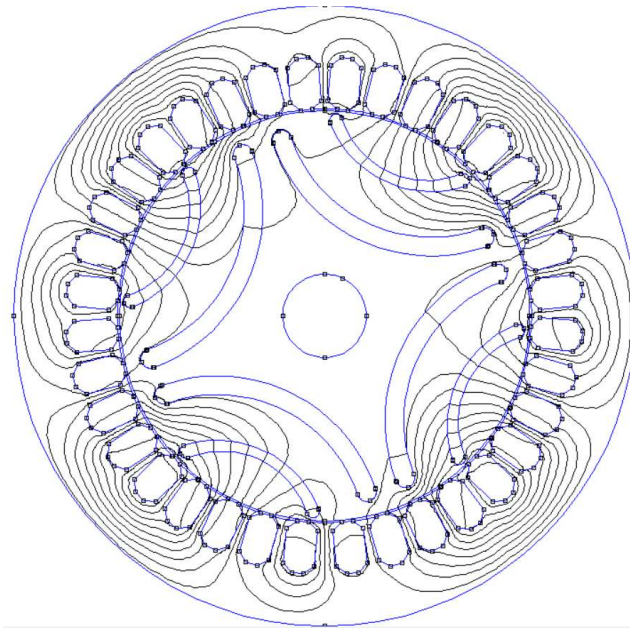


Figura 6.9 - Resultado da simulação da topologia 2 na posição desalinhada.

Na figura 6.10, observa-se que já não existe um foco de fluxo como havia na figura 6.8. Então, a junção de longos caminhos de fluxo e menor concentração de fluxo, dá origem a menores valores de fluxo como a tabela 6.7 mostra. A figura 6.8 apresenta o mesmo comportamento de fluxo que o da figura 6.4.

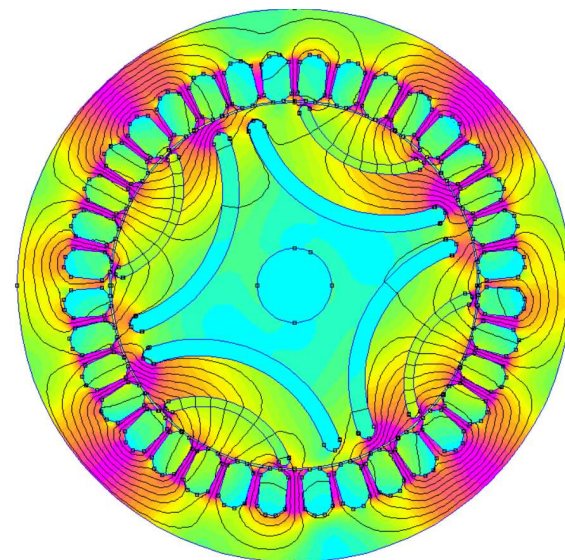


Figura 6.10 - Resultado da simulação da topologia 2 na posição desalinhada com foco na concentração de fluxo.

Como se pode observar nas figuras 6.4 e 6.10, os caminhos que o fluxo tem e a concentração do mesmo é bastante semelhante. Posto estes resultados, pode-se assumir que o que influencia os

valores de fluxo e de binário na máquina é a grossura das barreiras, para as simulações que foram feitas.

6.3 Resultados da Topologia 2A

Os valores da tabela 6.10, que corresponde à simulação da topologia 2A, quando comparados com os valores da topologia original (topologia 2), verifica-se que há uma diminuição no valor máximo de binário. Mantendo-se, no entanto, na figura 5.15, a diferença relativa entre os valores das curvas o mesmo ao longo das variadas posições do rotor.

Tabela 6.10 - Resultados do binário para a topologia 2A.

Graus (°)	Binário (Nm)					
	Corrente					
	6 A	5,186 A	3,9 A	3,11 A	1,8 A	1 A
0	1,72	1,465	1,34	1,32	1,2	0,675
2	8	7,3	7	6,34	5,76	4,23
4	13,4	12,43	10	8,5	7,6	6,7
5	16,44	14,8	12,64	10,44	9,6	8,7
10	20,628	19,3	17,4	15,6	13,4	11,43
15	34	32,52	30,43	28,3	25,8	23,2
20	39,2	38,664	36,9	35,4	33,2	31,46
23	38,4	38	35,3	34,3	32,1	29,6
26	37,5	36	33,42	32,12	31,6	28,7
29	36,2	35	32,1	31,43	29,4	26,4
30	35,7	34	31,672	29	27	25
40	27,28	24,28	22,4	21,836	19,64	16,4
41	22	19	17	16	14	11
42	19	16	14	13	11	9
43	16	13	11	10	8	7
44	10	9	7	6	4	5
45	2,45	3,24	4,1	4,64	3,55	4,32

Segundo a tabela 6.10, os valores de binário da topologia 2A, ao contrário da topologia 1, atingem o valor máximo por volta dos 20° de posicionamento e mantém-se nesses valores altos até aos 30°. Estes valores depois decrescem rapidamente para valores quase nulos, o que indica que o posicionamento do rotor, para esta topologia, deve estar entre os 20° e os 30° para se obter um valor máximo de binário.

Comparativamente à topologia 1, a topologia 2A possui valores de binário inferiores, o que pode indicar que a alteração do material da barreira influenciou de forma negativa o binário da

máquina, fornecendo menos binário do que a sua topologia original e do que a topologia inicial (Topologia 1).

Todas as curvas da figura 5.15 seguem o mesmo comportamento e, segundo os resultados obtidos, quanto mais se aumenta a corrente, maior será o binário máximo, comprovando então a expressão 3.3.

Na figura 5.17, as curvas de fluxo possuem o comportamento que era expectável. Estas curvas foram separadas no gráfico para melhor se perceber o comportamento do fluxo, isto quer dizer que a escala apresentada na figura 5.17 não é a escala real.

Na tabela 6.11 estão os resultados da simulação do fluxo e, como se pode constatar, comprovam o que foi dito no capítulo 3. Onde diz que o fluxo é máximo quando o rotor está alinhado com o estator e os resultados confirmam essa afirmação.

Tabela 6.11 - Resultados do fluxo para a topologia 2A.

Graus (°)	Fluxo (Wb)					
	Corrente					
	1 A	1,8 A	3,11 A	3,9 A	5,186 A	6 A
0	0,00708	0,00752	0,007676	0,00792	0,007932	0,00812
5	0,006088	0,00612	0,00628	0,006564	0,006752	0,006792
10	0,006068	0,005392	0,005532	0,00576	0,006338	0,006
20	0,00564	0,0048	0,005192	0,005256	0,005908	0,005428
30	0,005332	0,00484	0,00494	0,005112	0,005464	0,00522
40	0,00476	0,00464	0,004663	0,004764	0,004894	0,004856
45	0,00476	0,004552	0,00456	0,004656	0,004864	0,004755

Comparativamente aos resultados da topologia 2, os valores da topologia 2A de fluxo são bastante superiores. O que pode indicar que a alteração do material de aço para ar, beneficiou a circulação do fluxo na máquina. Os valores da tabela 6.11 também são superiores aos valores das tabelas 6.2 e 6.3 que corresponde à topologia inicial (topologia 1).

A partir da expressão 3.15, foi possível obter os resultados da tabela 6.12 e consequentemente dos resultados da figura 5.16. O comportamento do coeficiente de indução é inverso ao do fluxo visto que o coeficiente de indução é inversamente proporcional à corrente.

Tabela 6.12 - Resultados do coeficiente de indução para a topologia 2A.

Coeficiente de Indução (H)						
Graus (°)	Corrente					
	1 A	1,8 A	3,11 A	3,9 A	5,186 A	6 A
0	0,00708	0,004178	0,002468	0,002031	0,00153	0,001353
5	0,006088	0,0034	0,002019	0,001683	0,001302	0,001132
10	0,006068	0,002996	0,001779	0,001477	0,001222	0,001
20	0,00564	0,002667	0,001669	0,001348	0,001139	0,000905
30	0,005332	0,002689	0,001588	0,001311	0,001054	0,00087
40	0,00476	0,002578	0,001499	0,001222	0,000944	0,000809
45	0,00476	0,002529	0,001466	0,001194	0,000938	0,000792

Comparando a figura 5.16 com a figura 5.11, pode-se constatar que o comportamento do coeficiente de indução é o mesmo para as duas topologias. No entanto, os valores do coeficiente de indução da topologia 2A são superiores aos da topologia original (topologia 2) e às da topologia base (topologia 1) como mostram as tabelas 6.13, 6.7 e 6.4, respetivamente. Estes resultados são justificados pelo facto de o fluxo da topologia 2A ser superior aos fluxos da topologia 2 e da topologia 1, uma vez que o coeficiente de indução depende do fluxo segundo a expressão 3.15.

A tabela 6.13 possui os resultados que foram usados para a figura 5.17, que demonstra o comportamento do fluxo à medida que se afasta da posição alinhada e se aproxima da posição desalinhada. Sendo que na figura 5.18 é possível observar a zona onde a máquina entra em saturação, a mesma zona é por volta dos 1 A, o que é mais cedo que todos os outros modelos, o que pode revelar que o material selecionado permite que a máquina sature com mais facilidade.

Tabela 6.13 - Resultados do fluxo para a topologia 2A em função da corrente.

Fluxo (Wb)							
Corrente	Graus						
	0°	5°	10°	20°	30°	40°	45°
0,7 A	0,001101	0,000947	0,000944	0,000877	0,000829	0,00074	0,00074
0,8 A	0,003059	0,00263	0,002621	0,002436	0,002303	0,002056	0,002056
0,9 A	0,005664	0,00487	0,004854	0,004512	0,004266	0,003808	0,003808
1 A	0,00708	0,006088	0,006068	0,00564	0,005332	0,00476	0,00476
1,8 A	0,00752	0,00612	0,005392	0,0048	0,00484	0,00464	0,004552
3,11 A	0,007676	0,00628	0,005532	0,005192	0,00494	0,004663	0,00456
3,9 A	0,00792	0,006564	0,00576	0,005256	0,005112	0,004764	0,004656
5,186 A	0,007932	0,006752	0,006338	0,005908	0,005464	0,004894	0,004864
6 A	0,00812	0,006792	0,006	0,005428	0,00522	0,004856	0,004755

Comparando as figuras 5.6, 5.12 e 5.18, pode-se observar que as curvas da figura 5.18 são muito mais próximas das da figura 5.6 do que as da figura 5.12. Quando se observa o comportamento do fluxo da topologia 2 e da topologia 2A em função da corrente, constata-se que o fluxo possui uma maior queda de valor na topologia 2A quando se aproxima da posição desalinhada o que pode sugerir que o material escolhido para a topologia 2A dificulta mais a passagem de fluxo na posição desalinhada que a topologia 2.

Para melhor entender os resultados obtidos na tabela 6.11, a figura 6.9 fornece algum esclarecimento. Já foi estabelecido que os resultados da tabela 6.11 indicam que o fluxo diminui à medida que se afasta da posição alinhada, mas para se perceber a causa do comportamento do fluxo, é necessário observar as figuras 6.11, 6.12, 6.13 e 6.14.

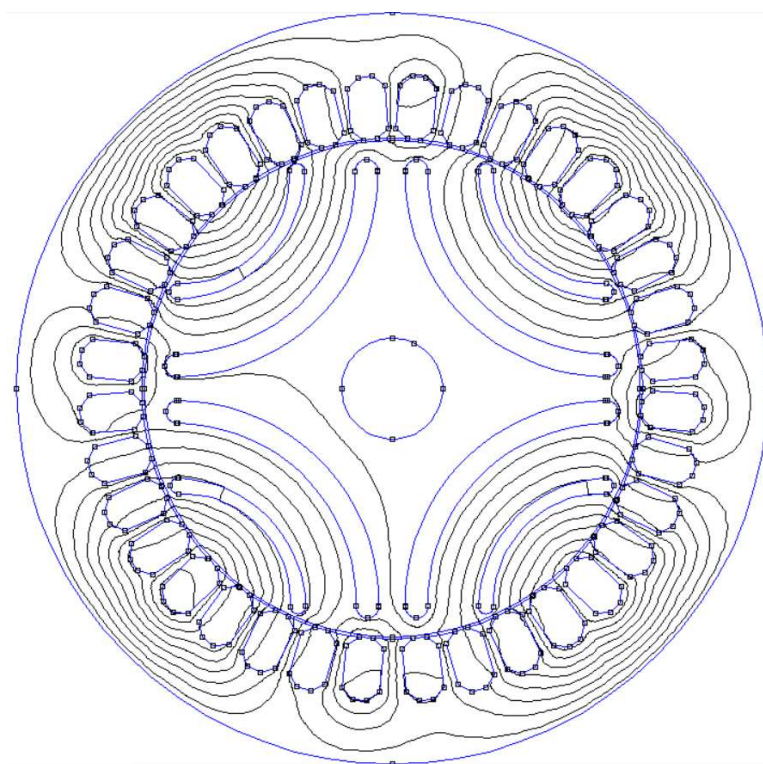


Figura 6.11 - Resultado da simulação da topologia 2A na posição alinhada.

Observando a figura 6.11, pode-se verificar que os caminhos que o fluxo toma são muito semelhantes aos da figura 6.7, sendo esses caminhos o mais curtos possível. Assim como na figura 6.7, o fluxo circula maioritariamente pela barreira exterior, no entanto, já existe fluxo a circular na zona do núcleo do rotor. Estes fatores levam a que o fluxo seja maior porque há mais concentração de fluxo e esse fluxo segue por caminhos curtos, mais uma vez justificando os resultados da tabela 6.11. A figura 6.12 serve como complemento da figura 6.11, uma vez que demonstra onde o fluxo se concentra mais e, comparativamente à figura 6.8, é bastante similar.

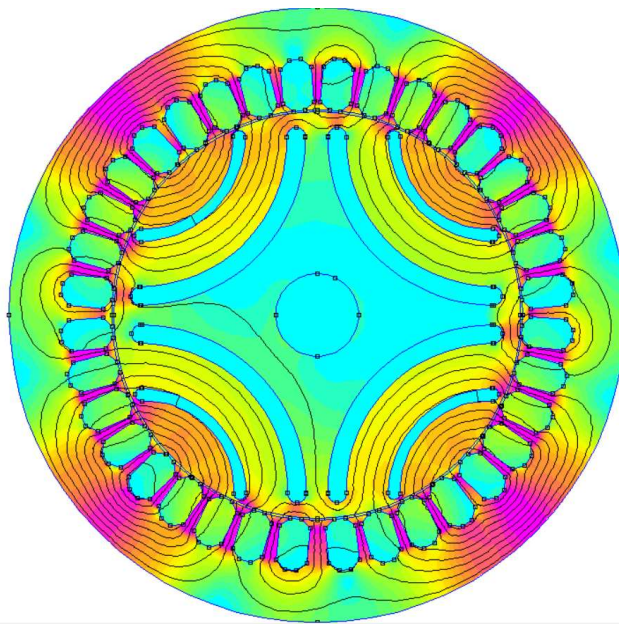


Figura 6.12 - Resultado da simulação da topologia 2A na posição alinhada com foco na concentração de fluxo.

As figuras 6.13 e 6.14, representam o rotor numa posição desalinhada, mais especificamente, nos 20°. Na figura 6.13, o fluxo já possui mais dificuldade em circular no rotor e apresenta caminhos mais longos de fluxo, podendo até em alguns momentos trespassar a barreira de fluxo para facilitar o caminho.

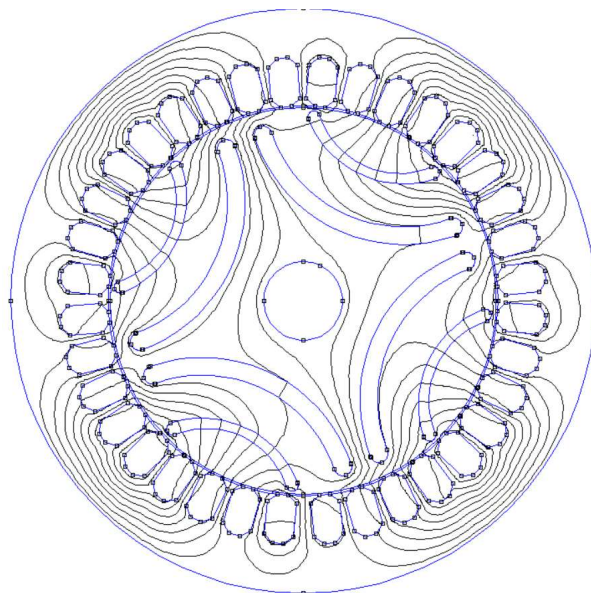


Figura 6.13 - Resultado da simulação da topologia 2A na posição desalinhada.

Na figura 6.14, observa-se que já não existe um foco de fluxo como havia na figura 6.12. Então, a junção de longos caminhos de fluxo e menor concentração de fluxo, dá origem a menores valores de fluxo como a tabela 6.11 mostra. A figura 6.12 apresenta um comportamento

diferente da figura 6.4 e da figura 6.10, uma vez que existe grande circulação de fluxo na zona do núcleo do rotor.

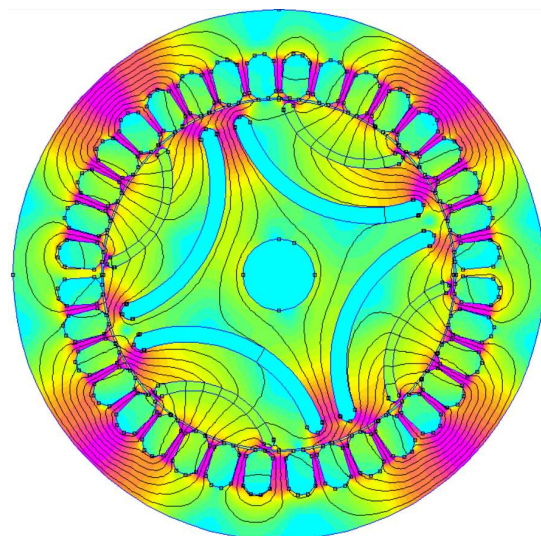


Figura 6.14 - Resultado da simulação da topologia 2A na posição desalinhada com foco na concentração de fluxo.

Tendo todos os resultados das tabelas 6.7 e 6.11, e das figuras 6.10 e 6.14, pode-se presumir que o ar permite uma maior circulação de fluxo, mas a custo de perda de binário. Uma vez que na topologia 2A só se altera o material das barreiras de fluxo, quando comparado com a topologia 2, então o material tem direta influência no desempenho da máquina.

6.4 Resultados do Topologia 2B

Os valores da tabela 6.14, que corresponde à simulação do modelo 2B, quando comparados com os valores da topologia original (topologia 2), verifica-se que há uma diminuição no valor máximo de binário. O comportamento das curvas da figura 5.21 é relativamente o mesmo que o das curvas da figura 5.15.

Segundo a tabela 6.14, os valores de binário do modelo 2B, ao contrário do modelo 1, atingem o valor máximo por volta dos 20° de posicionamento e mantêm-se nesses valores altos até aos 30°. Estes valores depois decrescem rapidamente para valores quase nulos o que indica que o posicionamento do rotor, para esta topologia, deve estar entre os 20° e os 30° para se obter um valor máximo de binário.

Tabela 6.14 - Resultados do binário para a topologia 2B.

Graus (°)	Binário (Nm)					
	Corrente					
	6 A	5,186 A	3,9 A	3,11 A	1,8 A	1 A
0	1,25	1,356	1,12	0,93	0,97	1,1
2	4,76	4,544	3,761	2,944	2,7	2,6
4	5,13	4,705	4,5408	4,56	3,072	3,88
5	6,42	6,13	5,92	5,641	4,63	4,128
10	8,52	8,508	8,6	7,5	5,2	5,468
15	18,6	15,288	13,48	12,84	12,82	12,8
20	21,96	21,392	19,08	15,36	15,92	15,84
23	25,67	23,41	19,432	17,84	16,021	16,34
26	27,2	24,36	19,68	19,032	16,16	17,8
29	25,423	23,17	18,821	18,62	15,73	15,78
30	23,8	20,904	17,024	16,56	15,108	14,43
40	17,72	13	12,87	12,68	9,36	6,888
41	13,53	11,42	11,017	10,95	8,532	6,213
42	11,832	10,25	9,73	9,31	7,151	5,821
43	9,024	8,71	8,12	7,512	6,188	4,47
44	6,31	5,14	4,93	3,763	3,113	2,903
45	2,74	2,42	1,97	1,32	1,14	1,078

Comparativamente à topologia 1, a topologia 2B possui valores de binário inferiores, o que pode indicar que a alteração do material da barreira influenciou de forma negativa o binário da máquina, fornecendo menos binário do que a sua topologia original, do que a topologia inicial (topologia 1) e do que a topologia 2A. Estes resultados podem ser justificados pelo facto de o material seleccionado ser um íman que facilita a circulação do fluxo ainda mais e consequentemente o rotor não produz um binário tão forte. Uma vez que o alnico irá produzir uma força que facilita o alinhamento do rotor com o estator, o rotor não necessitará de produzir um binário tão alto para se alinhar.

Todas as curvas da figura 5.21 seguem o mesmo comportamento e, segundo os resultados obtidos, quanto mais se aumenta a corrente, maior será o binário máximo, comprovando então a expressão 3.3.

Na figura 5.23, as curvas de fluxo possuem o comportamento que era expectável. Estas curvas foram separadas no gráfico para melhor se perceber o comportamento do fluxo, isto quer dizer que a escala apresentada na figura 6.19 não é a escala real.

Na tabela 6.15 estão os resultados da simulação do fluxo e, como se pode constatar, comprovam o que foi dito no capítulo 3. Onde diz que o fluxo é máximo quando o rotor está alinhado com o estator e os resultados confirmam essa afirmação.

Tabela 6.15 - Resultados do fluxo para a topologia 2B.

Graus (°)	Fluxo (Wb)					
	Corrente					
	1 A	1,8 A	3,11 A	3,9 A	5,186 A	6 A
0	0,003668	0,004388	0,0053	0,005348	0,005383	0,005408
5	0,003259	0,00424	0,0052	0,005208	0,005248	0,00535
10	0,003068	0,00424	0,004936	0,005092	0,005164	0,005248
20	0,003126	0,004047	0,004356	0,004532	0,004424	0,004503
30	0,003108	0,004	0,00428	0,00452	0,00436	0,004488
40	0,002766	0,003519	0,00424	0,00414	0,00428	0,004248
45	0,00269	0,003298	0,0042	0,0038844	0,004208	0,00404

Comparativamente aos resultados da topologia 2, os valores da topologia 2B de fluxo são ligeiramente superiores, o que pode indicar que a alteração do material de aço para alnico, beneficiou a circulação do fluxo na máquina ligeiramente. Os valores da tabela 6.15 também são superiores aos valores das tabelas 6.2 e 6.3 que corresponde à topologia original (topologia 2).

A partir da expressão 3.15, foi possível obter os resultados da tabela 6.16 e consequentemente dos resultados da figura 5.22. O comportamento do coeficiente de indução é inverso ao do fluxo visto que o coeficiente de indução é inversamente proporcional à corrente.

Tabela 6.16 - Resultados do coeficiente de indução para a topologia 2B.

Graus (°)	Coeficiente de Indução (H)					
	Corrente					
	1 A	1,8 A	3,11 A	3,9 A	5,186 A	6 A
0	0,003668	0,002438	0,001704	0,001371	0,001038	0,000901
5	0,003259	0,002356	0,001672	0,001335	0,001012	0,000892
10	0,003068	0,002356	0,001587	0,001306	0,000996	0,000875
20	0,003126	0,002248	0,001401	0,001162	0,000853	0,00075
30	0,003108	0,002222	0,001376	0,001159	0,000841	0,000748
40	0,002766	0,001955	0,001363	0,001062	0,000825	0,000708
45	0,00269	0,001832	0,00135	0,000996	0,000811	0,000673

Comparando a figura 5.22 com a figura 5.10, pode-se constatar que o comportamento do coeficiente de indução é o mesmo para as duas topologias. No entanto, os valores do coeficiente de indução da topologia 2B são superiores aos da topologia original (topologia 2) e aos da topologia inicial (topologia 1) como mostram as tabelas 6.16, 6.7 e 6.4, respetivamente. Estes resultados são justificados pelo facto do fluxo da topologia 2B ser superior aos fluxos da

topologia 2 e da topologia 1, uma vez que o coeficiente de indução depende do fluxo segundo a expressão 3.15.

Porém, os valores do coeficiente de indução e de fluxo da topologia 2B são inferiores aos da topologia 2A o que sugere que o ar proporciona uma maior circulação de fluxo do que o alnico.

A tabela 6.17 possui os resultados que foram usados para a figura 5.24, que demonstra o comportamento do fluxo à medida que se afasta da posição alinhada e se aproxima da posição desalinhada. Sendo que na figura 5.24 é possível observar a zona onde a máquina entra em saturação, a mesma zona é por volta dos 3,11 A.

Tabela 6.17 - Resultados do fluxo para a topologia 2B em função da corrente.

Corrente	Fluxo (Wb)						
	Graus						
	0°	5°	10°	20°	30°	40°	45°
0,7 A	0,00057	0,000507	0,000477	0,000486	0,000483	0,00043	0,000418
0,8 A	0,001585	0,001408	0,001325	0,001351	0,001343	0,001195	0,001162
0,9 A	0,002934	0,002607	0,002454	0,002501	0,002486	0,002213	0,002152
1 A	0,003668	0,003259	0,003068	0,003126	0,003108	0,002766	0,00269
1,8 A	0,004388	0,00424	0,00424	0,004047	0,004	0,003519	0,003298
3,11 A	0,0053	0,0052	0,004936	0,004356	0,00428	0,00424	0,0042
3,9 A	0,005348	0,005208	0,005092	0,004532	0,00452	0,00414	0,003884
5,186 A	0,005383	0,005248	0,005164	0,004424	0,00436	0,00428	0,004208
6 A	0,005408	0,00535	0,005248	0,004503	0,004488	0,004248	0,00404

Comparando as figuras 5.6, 5.12 e 5.24, pode-se observar que as curvas da figura 5.24 são muito mais próximas das da figura 5.6 do que as da figura 5.12. Quando se observa o comportamento do fluxo da topologia 2 e da topologia 2B em função da corrente, constata-se que o fluxo possui uma maior queda de valor na topologia 2A quando se aproxima da posição desalinhada, o que pode sugerir que o material escolhido para a topologia 2A dificulta mais a passagem de fluxo na posição desalinhada que a topologia 2. No entanto, quando comparando as figuras 5.24 e 5.18, pode-se observar que o comportamento do fluxo da topologia 2B e 2A é bastante similar, o que indica que a diferença de material não está a influenciar significativamente o comportamento do fluxo consoante a corrente.

Para melhor entender os resultados obtidos na tabela 6.15, a figura 6.13 fornece algum esclarecimento. Já foi estabelecido que os resultados da tabela 6.15 indicam que o fluxo diminui à medida que se afasta da posição alinhada, mas para se perceber a causa do comportamento do fluxo, é necessário observar as figuras 6.15, 6.16, 6.17 e 6.18.

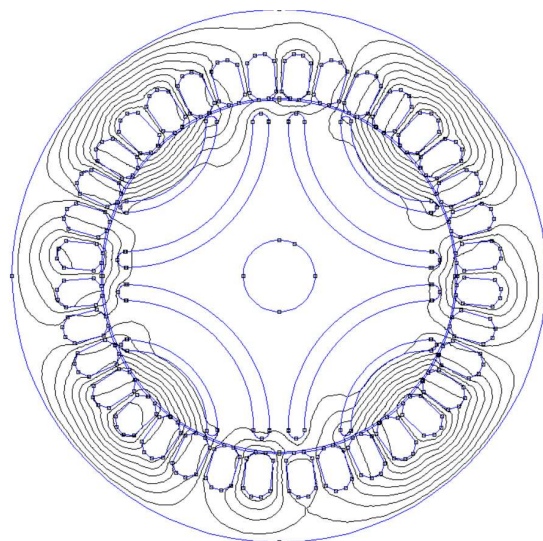


Figura 6.15 - Resultado da simulação da topologia 2B na posição alinhada

Observando a figura 6.15, pode-se verificar que os caminhos que o fluxo toma são semelhantes aos da figura 6.7, sendo esses caminhos o mais curtos possível. No entanto, ao contrário da figura 6.10, o fluxo circula praticamente na totalidade pela barreira exterior. Estes fatores levam a que o fluxo seja maior porque há mais concentração de fluxo e esse fluxo segue por caminhos curtos, mais uma vez justificando os resultados da tabela 6.15. A figura 6.16 serve como complemento da figura 6.15, onde se observa que a concentração de fluxo na parte exterior do rotor é maior que o da figura 6.8.

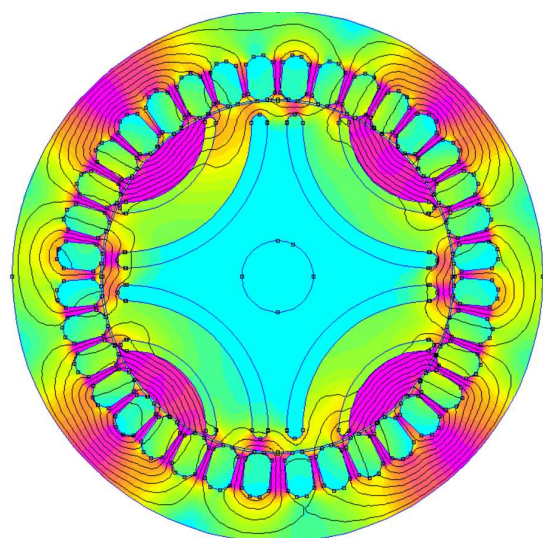


Figura 6.16 - Resultado da simulação da topologia 2B na posição alinhada com foco na concentração de fluxo.

As figuras 6.17 e 6.18, representam o rotor numa posição desalinhada, mais especificamente, nos 20°. Na figura 6.17, o fluxo já possui mais dificuldade em circular no rotor e apresenta

caminhos mais longos de fluxo, podendo até em alguns momentos trespassar a barreira de fluxo para facilitar o caminho. No entanto, com o material alnico, ele próprio possui um campo magnético que só se torna aparente quando se desalinha o rotor.

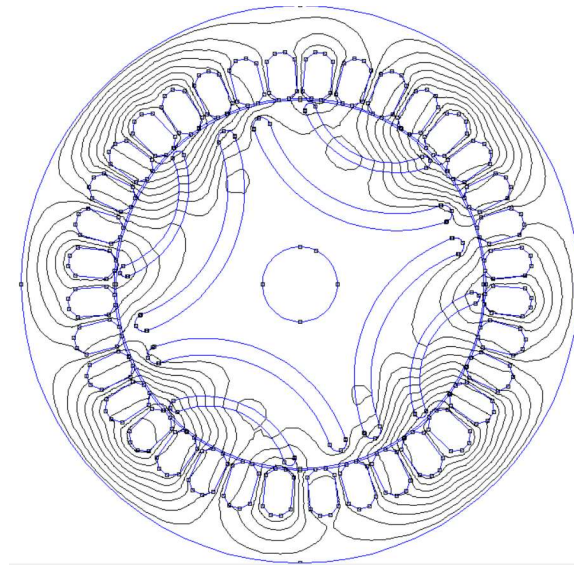


Figura 6.17 - Resultado da simulação da topologia 2B na posição desalinhada.

Na figura 6.18, observa-se que já não existe um foco de fluxo como havia na figura 6.16. Então, a junção de longos caminhos de fluxo e menor concentração de fluxo, dá origem a menores valores de fluxo como a tabela 6.15 mostra. A figura 6.18 apresenta um comportamento diferente da figura 6.4 e da figura 6.10, uma vez que o material alnico possui um campo magnético próprio que só se torna aparente quando se desalinha o rotor. Esse campo magnético vai facilitar o alinhamento do rotor com o estator e por isso os valores de binário serão mais baixos. Assim justificando os resultados obtidos na tabela 6.14.

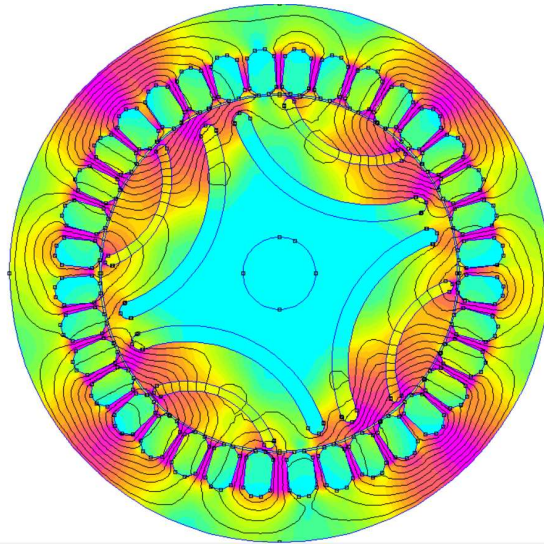


Figura 6.18 - Resultado da simulação da topologia 2B na posição desalinhada com foco na concentração de fluxo.

Tendo todos os resultados das tabelas 6.6, 6.14, 6.7 e 6.15, e das figuras 6.10 e 6.18, pode-se presumir que o alnico permite um alinhamento facilitado do rotor com o estator, no entanto com um custo de um baixo binário como comprovado pela tabela 6.15. Também se pode assumir que o alnico não será influente no valor de fluxo quando comparando com o ar.

6.5 Resultados da Topologia 3

Após realizadas as simulações para a topologia 3, foi possível observar o comportamento da máquina. Sendo que a tabela 6.18 representa os valores de binário que foram retirados da simulação e usados para formar a figura 5.27.

Segundo a tabela 6.18, os valores de binário da topologia 3, ao contrário da topologia 1, atingem o valor máximo por volta dos 20° de posicionamento e mantém-se nesses valores altos até aos 30°. É importante salientar também que o valor de binário máximo nesta topologia é quase constante, só ocorrendo uma pequena variação de 2 Nm entre 20° e os 30°. Estes valores depois decrescem rapidamente para valores quase nulos o que indica que o posicionamento do rotor, para esta topologia, deve estar entre os 20° e os 30° para se obter um valor máximo de binário.

Tabela 6.18 - Resultados do binário para a topologia 3.

Graus (°)	Binário (Nm)					
	Corrente					
	6 A	5,186 A	3,9 A	3,11 A	1,8 A	1 A
0	1,3	1,3	1,332	1,2	1	0,8
2	6	5	5	3	2,4	2
4	11	9	8	6	5	3
5	16,44	14	12,12748	11	10,504	7,8
10	26,5508	24,192	20,76	18,56	15,2	9,96
15	35	31	27	22	20	17
20	50,0784	47,342	36,0952	34	30	29,94
23	50,4	47,4	37	36	32	30
26	51	47,5	38	36,7	32,5	30,1
29	51,6	47,56	38,6	37,4	33	30,2
30	52,42	47,5588	39,5144	38,72	34,468	30,3
40	35	30	27	25	23	20
41	22	20	18	16	14	12
42	17	15	13	11	9	7
43	11	9	6	5	4	3
44	5	3	2	2	1,9	1,7
45	1,4	1,2	1,4	1,3	1,492	1,2

Comparativamente à topologia 1, a topologia 3 possui valores de binário ligeiramente superiores o que pode indicar que o aumento do número de barreiras de fluxo tem influência no binário da máquina, fornecendo mais binário que a topologia inicial (topologia 1).

Todas as curvas da figura 5.27 seguem o mesmo comportamento e, segundo os resultados obtidos, quanto mais se aumenta a corrente, menor será o binário máximo, como se pode observar na tabela 6.18.

Na figura 5.29, as curvas de fluxo possuem o comportamento que era expectável. Estas curvas foram separadas no gráfico para melhor se perceber o comportamento do fluxo, isto quer dizer que a escala apresentada na figura 5.29 não é a escala real.

Na tabela 6.19 estão os resultados da simulação do fluxo e, como se pode constatar, comprovam o que foi dito no capítulo 3. Onde diz que o fluxo é máximo quando o rotor está alinhado com o estator e os resultados confirmam essa afirmação.

Tabela 6.19 - Resultados do fluxo para a topologia 3.

Graus (°)	Fluxo (Wb)					
	Corrente					
	1 A	1,8 A	3,11 A	3,9 A	5,186 A	6 A
0	0,002777	0,00422	0,0046	0,00548	0,0062	0,006308
5	0,00227	0,004	0,004348	0,00494	0,005304	0,00532
10	0,002017	0,003116	0,00428	0,004276	0,004492	0,004472
20	0,00196	0,003075	0,00408	0,004228	0,00424	0,00432
30	0,001952	0,00302	0,003834	0,004052	0,004016	0,004068
40	0,001928	0,0025	0,0036	0,003769	0,003912	0,0039
45	0,001649	0,002376	0,003412	0,003651	0,003816	0,003808

Comparativamente aos resultados da topologia 1, os valores da topologia 3 são inferiores. O que é justificado pela dificuldade de circulação do fluxo, uma vez que o número de barreiras de fluxo aumentou, tendo desta forma reduzido o fluxo total da máquina.

A partir da expressão 3.15, foi possível obter os resultados da tabela 6.20 e consequentemente dos resultados da figura 5.28. O comportamento do coeficiente de indução é inverso ao do fluxo visto que o coeficiente de indução é inversamente proporcional à corrente.

Tabela 6.20 - Resultados do coeficiente de indução para a topologia 3.

Graus (°)	Coeficiente de Indução (H)					
	Corrente					
	1 A	1,8 A	3,11 A	3,9 A	5,186 A	6 A
0	0,002777	0,002344	0,001479	0,001405	0,001196	0,0009
5	0,00227	0,002222	0,001398	0,001267	0,001023	0,000887
10	0,002017	0,001731	0,001376	0,001096	0,000866	0,0008
20	0,00196	0,001708	0,001312	0,001084	0,000818	0,00072
30	0,001952	0,001678	0,001233	0,001039	0,000774	0,000678
40	0,001928	0,001389	0,001158	0,000966	0,000754	0,00065
45	0,001649	0,00132	0,001097	0,000936	0,000736	0,000635

Comparando a figura 5.28 com a figura 5.7, pode-se constatar que o comportamento do coeficiente de indução é o mesmo para as duas topologias. No entanto, os valores do coeficiente de indução da topologia 3 são inferiores aos da topologia 1 como mostram as tabelas 6.20 e 6.4, respetivamente.

A tabela 6.21 possui os resultados que foram usados para a figura 5.30, que demonstra o comportamento do fluxo à medida que se afasta da posição alinhada e se aproxima da posição desalinhada. Sendo que na figura 5.30 é possível observar a zona onde a máquina entra em saturação, a mesma zona é por volta dos 3,11 A.

Tabela 6.21 - Resultados do fluxo para a topologia 3 em função da corrente.

Corrente	Fluxo (Wb)						
	Graus						
	0°	5°	10°	20°	30°	40°	45°
0,7 A	0,0006	0,0005	0,0004	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002
0,8 A	0,0015	0,0011	0,0009	0,0007	0,0006	0,0004	0,0003
0,9 A	0,0025	0,0023	0,0018	0,0014	0,0012	0,0011	0,0009
1 A	0,004	0,003	0,0024	0,00196	0,001952	0,001928	0,001649
1,8 A	0,005	0,004	0,003116	0,003075	0,00302	0,0025	0,002376
3,11 A	0,0057	0,0048	0,00428	0,00408	0,003834	0,0036	0,003412
3,9 A	0,006	0,005	0,004276	0,004228	0,004052	0,003769	0,003651
5,186 A	0,0062	0,005304	0,004492	0,00424	0,004016	0,003912	0,003816
6 A	0,0062	0,00532	0,004472	0,00432	0,004068	0,0039	0,003808

Comparando as figuras 5.30 e 5.9, pode-se observar que as curvas da figura 5.30 são bastante semelhantes às da figura 5.9, pelo que pode indicar que o aumento do número de barreiras de 2 para 3, não tem influencia significativa na saturação máquina.

Para melhor entender os resultados obtidos na tabela 6.19, a figura 5.25 fornece algum esclarecimento. Já foi estabelecido que os resultados da tabela 6.19 indicam que o fluxo diminui à medida que se afasta da posição alinhada, mas para se perceber a causa do comportamento do fluxo, é necessário observar as figuras 6.19, 6.20, 6.21 e 6.22.

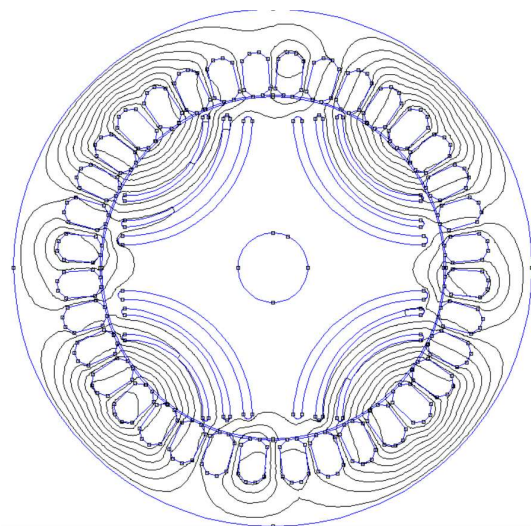


Figura 6.19 - Resultado da simulação da topologia 3 na posição alinhada.

Observando a figura 6.19, pode-se verificar que os caminhos que o fluxo toma são semelhantes aos da figura 6.1, sendo esses caminhos o mais curtos possível. Assim como na figura 6.1, o fluxo circula maioritariamente pela barreira exterior. Estes fatores levam a que o fluxo seja maior porque há mais concentração de fluxo e esse fluxo segue por caminhos curtos, mais uma vez justificando os resultados da tabela 6.19. A figura 6.20 serve como complemento da figura 6.19.

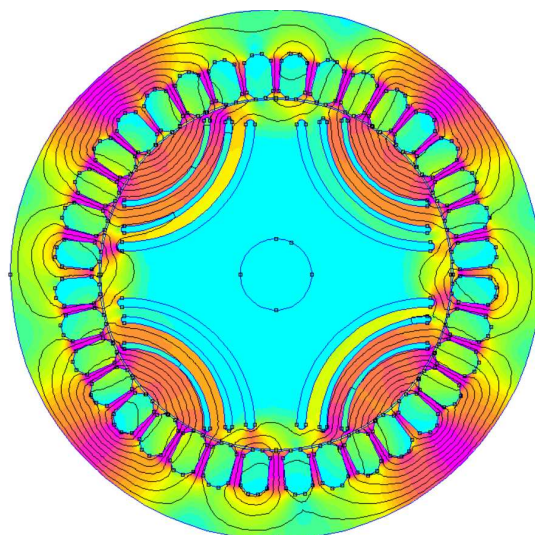


Figura 6.20 - Resultado da simulação da topologia 3 na posição alinhada com foco na concentração de fluxo.

As figuras 6.21 e 6.22, representam o rotor numa posição desalinhada, mais especificamente, nos 20°. Na figura 6.21, o fluxo já possui mais dificuldade em circular no rotor e apresenta caminhos mais longos de fluxo, podendo até em alguns momentos trespassar a barreira de fluxo para facilitar o caminho.

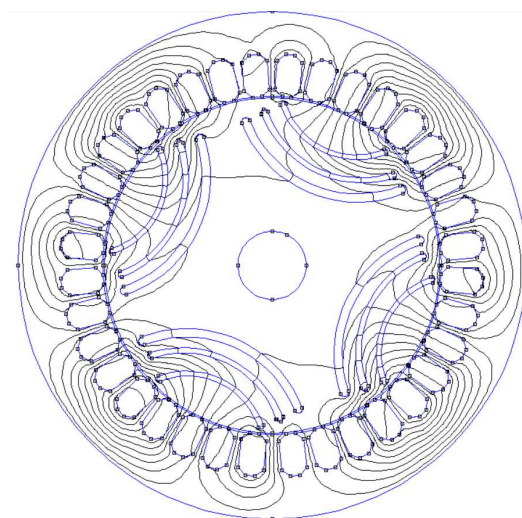


Figura 6.21 - Resultado da simulação da topologia 3 na posição desalinhada.

Na figura 6.22, observa-se que já não existe um foco de fluxo como havia na figura 6.20. Então, a junção de longos caminhos de fluxo e menor concentração de fluxo, dá origem a menores valores de fluxo como a tabela 6.19 mostra. A figura 6.22 apresenta o mesmo comportamento de fluxo que o da figura 6.4.

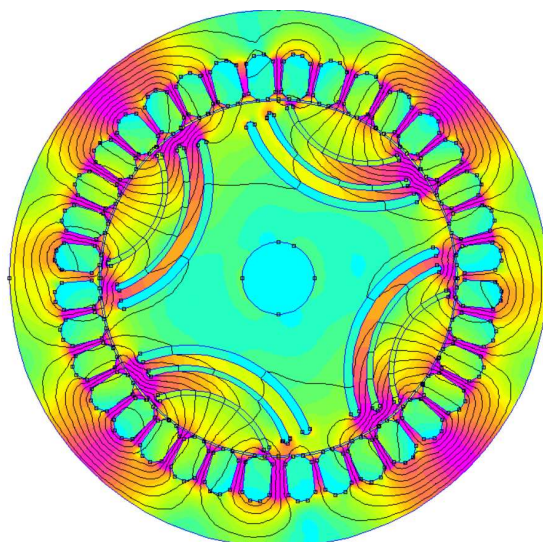


Figura 6.22 - Resultado da simulação da topologia 3 na posição desalinhada com foco na concentração de fluxo.

Tendo todos os resultados das tabelas 6.2, 6.3 e 6.19, e das figuras 6.4 e 6.22, pode-se presumir que o barramento extra não tem influencia no comportamento do fluxo, mas possui influencia nos valores de fluxo e de binário, como comprovado pelas tabelas 6.19.

7 Conclusão

Ao efetuar a análise da influência da estrutura interna do rotor no binário e no fluxo desenvolvido da máquina, foi possível determinar alguns pontos fulcrais.

A ideia inicial seria de analisar três topologias de rotor. No entanto, ao longo do processo de estudo, verificou-se que a topologia 2 apresentava valores muito satisfatórios de binário, por essa razão foram feitas variantes dessa topologia, de forma a verificar se alterando o material das barreiras seria benéfico para o binário. Mas o que se verificou foi uma descida de binário nas duas variantes, o que indica que o ar e o material alnico não ajudaram a fornecer mais binário à máquina, no entanto, com o ar como barreira de fluxo, verificou-se valores de fluxo bastante superiores a todas as outras topologias. O que indica que o ar facilita a circulação natural do fluxo dentro da máquina. Apesar dos materiais escolhidos para os submodelos terem ficado aquém em termos de valores de binário, já foi provado que uma mistura dos dois materiais como barramento de fluxo juntos, fornecem bom binário [6]. Sendo então uma recomendação para o futuro de se simular os dois materiais juntos para se verificar a sua influência nas características do motor.

Na análise da topologia 1, os resultados foram os esperados, sendo, no entanto surpreendente, o facto de a posição de maior binário não ser na posição de 45° (posição em quadratura). Em todos os modelos a posição de maior binário nunca foi nos 45° , pelo que se especular que a forma das barreiras influencia diretamente a zona de maior binário, sendo por isso necessário mais estudos no futuro sobre mais formas geométricas da estrutura do rotor para se obter outros resultados interessantes. Este foi um dos pontos fulcrais possíveis de determinar.

Nos resultados da topologia 2 foi possível se observar um aumento de binário considerável, face à topologia 1, o que mostra que o aumento das dimensões das barreiras teve influência direta no binário. No entanto, nesta dissertação não foi possível determinar até que ponto o aumento ou diminuição das dimensões das barreiras, faz aumentar o binário, porém, segundo Martins [12], a espessura das barreiras, deve estar dentro de uma relação com o espaçamento dos caminhos do fluxo, podendo essa razão variar consoante as dimensões da máquina. A influência direta da espessura das barreiras de fluxo foi outro ponto fulcral possível de determinar.

No estudo da topologia 3, foi adicionado mais uma barreira de fluxo, no entanto, essa nova barreira não influenciou de forma significativa o binário, pelo que se pode especular que, adicionar uma nova barreira de fluxo com a mesma relação de tamanhos, face às barreiras iniciais, não beneficia a máquina. Porém, neste estudo da topologia 3, não se verificou se

aumentar as dimensões das barreiras todas ajudaria o binário da máquina. Apesar de ter sido provado que o aumento da dimensão dos barramentos, aumenta o binário, isto pode não ser verdade para um maior número de barreiras, uma vez que essa hipótese não foi testada. Não foi possível determinar se o número de barreiras possui influencia significativa nas características da máquina.

Tendo em conta todos os resultados das topologias, pode-se concluir que a topologia 2 apresenta uma vantagem maior face às outras topologias, sendo que é o que mais binário produz. A topologia 2A, possui a vantagem de ser a topologia mais fácil e mais económico de se realizar. A topologia 2B, apresenta uma vantagem de conseguir que os valores do fluxo não sofram muitas diferenças quando se altera a posição do rotor. No entanto, o material do alnico, pode ser um material mais caro do que o simples aço. A topologia 3 apresenta a vantagem de conseguir manter o binário máximo durante mais posições de rotor, no entanto, esse binário é inferior ao de outras máquinas. Também acrescenta custos de produção, uma vez que possui mais uma barreira que as outras topologias.

8 Referências

- [1] A. Boglietti, A. C. (2005). *Experimental Comparison of Induction and Synchronous*. Itália: Politecnico di Torino –Dipartimento di Ingegneria Elettrica.
- [2] ABB. (2014). *Synchronous reluctance motor-drive package for machine builders*. ABB.
- [3] ABB. (s.d.). *Motoring Ahead (ABB Review)*. ABB.
- [4] Aníbal T. De Almeida, F. J. (s.d.). *VSDs for Electric*. SAVE.
- [5] Chun-Han Chen, Y.-J. C.-H.-F.-S. (2016). *Phase-Variable Modeling of a Synchronous Reluctance Motor Using PSIM*. China: Mingsin University of Science and Technology.
- [6] Engineering, L. (18 de 12 de 2020). Tesla Model 3's motor - The Brilliant Engineering behind it.
- [7] Gonçalves, N. d. (2013). *Tolerância a Falhas em Motores de Relutância Variável Comutados*. Coimbra: Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- [8] Huann-Keng Chiang, C.-A. C.-R.-S. (2006). *Current sensorless integral variable structure controller of synchronous reluctance motor*. China: Department of Electrical Engineering, National Yunlin University of Science & Technology.
- [9] Lipo, T. (1991). *Synchronous Reluctance Machines: A Viable Alternative for AC Drives?* Estados Unidos da América: University of Wisconsin-Madison.
- [10] Loránd Szabó, A. L. (2002). *Variable Reluctance PM Synchronous Motors: A Short History and New Developments*. Roménia: Technical University of Cluj.
- [11] M. Villani, M. T. (s.d.). *Experimental Comparison between Induction and Synchronous Reluctance Motor-Drives*. Itália: University of L'Aquila.
- [12] MARTINS, C. E. (2003). *MOTORES SÍNCRONOS DE RELUTÂNCIA COM BARREIRAS DE FLUXO E PARTIDA ASSÍNCRONA*. Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina.
- [13] Matos, D. M. (2014). *Controlo Vetorial de Motores Síncronos de Relutância*. Covilhã: UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR.
- [14] Mattede, H. (s.d.). *Mundo da Elétrica*. Obtido de mundodaeletrica: <https://www.mundodaeletrica.com.br/tipos-de-motores-eletricos-quais-sao/>
- [15] Monica-Adela Enache, C. N. (2007). ASPECTS REGARDING MODELLING OF RELUCTANCE SYNCHRONOUS MOTORS. *6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMECHANICAL AND POWER SYSTEMS* (pp. 126-129). Moldávia: University of Craiova.
- [16] Prakht V, D. V. (2018). *Theoretical Performance Analysis of Ultra Premium Efficiency PM Assisted Synchronous Reluctance Motor with Ferrite Magnets*. Rússia: Ural Federal University.
- [17] Rafael, S. F. (2010). *Controlo de Posição Angular de uma Máquina Elétrica de Relutância Comutada*. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa.

- [18] Reza–Rajabi Moghaddam, F. G. (2014). *Novel High-Performance SynRM Design Method: An Easy Approach for A Complicated Rotor Topology*. IEEE.
- [19] S. M. de Pancorbo, G. U. (2015). *Comparative Study between Induction Motor and Synchronous Reluctance Motor for Electrical Railway Traction Applications*. Espanha: University of Mondragon.
- [20] S.M.R. SADRI, M. (1997). *MULTI-FLUX GUIDED ROTOR FOR VARIABLE SPEED RELUCTANCE MOTORS*.
- [21] Takayoshi Matsuo, T. A. (1994). *Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine*. Estados Unidos da América: University of Wisconsin-Madison.